

# **Diseño de un sistema de producción de discos para pararrayos mediante la simulación computadorizada del proceso**

*Jorge J. Delgado  
Francisco J. Rivera  
Candidatos a graduación*

## **Sinopsis**

Este trabajo se fundamenta en los cambios propuestos al diseño de facilidades y la adquisición de nuevos equipos para una compañía. Nuestro objetivo en el estudio es optimizar el uso de los equipos y los recursos humanos y económicos mediante el uso de la técnica de simulación<sup>1</sup>. Para este propósito seleccionamos el simulador de manufactura WITNESS de AT&T-ISTEL<sup>2</sup>. El simulador WITNESS nos permitió evaluar la ejecución del sistema con medidas tales como el "lead time", el número de unidades producidas por unidad de tiempo, los tamaños de los inventarios en proceso, la utilización del equipo y el personal y la proporción de trabajos que se reprocesan<sup>3</sup>.

## **Abstract**

This project is based upon proposed changes to the design of facilities and the acquisition of new equipment for a company. Our goal is to optimize the use of the equipment and the human and economic resources using the technique of process simulation<sup>1</sup>. For this purpose we selected the

---

<sup>1</sup> Law, A.M., 1989, "Pitfalls To Avoid In The Simulation Of Manufacturing Systems", *Industrial Engineering*, May, pages 28-31, 69.

## Delgado y Rivera/Diseño sistema producción

manufacturing simulator WITNESS from AT&T-ISTEL<sup>2</sup> This simulator allowed us to evaluate the production system using measurements like the lead time, units produced per unit of time, the size of the inventories in process, the use of equipment and personnel and the proportion of tasks reprocessed<sup>3</sup>.

### Introducción

La compañía *ELÉCTRICOS DE P.R., INC.*<sup>4</sup> se dedica a manufacturar instrumentos para protección contra descargas y fluctuaciones eléctricas. El componente principal de estos instrumentos son discos con las propiedades químicas necesarias para transformar la energía eléctrica en calor. Estos discos, cuya materia prima en forma de polvo se fabrica en una división especializada de la compañía en los E.U., se manufacturan en la planta de Puerto Rico mediante un proceso de varias fases.

*ELÉCTRICOS DE P.R.* modificará el proceso de producción de los discos en sus primeras etapas con el objetivo de aumentar su capacidad de producción para cumplir con pronósticos de aumento en la demanda. Nuestro proyecto estuvo dirigido específicamente a estas primeras etapas, para que cualquier cambio a realizarse fuese más efectivo.

El cambio propuesto por *ELÉCTRICOS DE P.R.* incluye la adquisición de nueva maquinaria y la reorganización de las actuales facilidades.

---

<sup>2</sup> AT&T ISTEEL, WITNESS, 1991, *Graphical Interactive Simulator*, Version 7.3.0, IBM PCs.

<sup>3</sup> Gogg, T. and Sands, C., 1990, "Hughes Aircraft Designs Automated Storeroom System Through Simulation Application", *Industrial Engineering*, August, pages 49-57

<sup>4</sup> Se usó un nombre ficticio para mantener la confidencialidad de los procesos de la compañía.

Cambios en el número de empleados y en los turnos de trabajo fueron otras alternativas en estas etapas del proceso.

### **Objetivos específicos**

Los objetivos específicos de este trabajo son:

1. Identificar los elementos que permitan aumentar la productividad del sistema en aproximadamente un 20% para cumplir con la demanda pronosticada
2. Identificar los elementos que permitan disminuir los inventarios en proceso en aproximadamente un 40%
3. Identificar los elementos que permitan eliminar la acumulación de unidades a reprocesarse.
4. Identificar los métodos que permitan la utilización efectiva de los recursos de producción
5. Identificar los métodos que permitan disminuir el tiempo total de las unidades en el sistema en aproximadamente un 40%
6. Diseñar un sistema efectivo para acarrear materiales
7. Identificar los recursos que limitan la producción

### **Definición del modelo**

La definición del modelo se establece analizando un amplio banco de datos, los parámetros que controlan el proceso bajo estudio y estimando las distribuciones estadísticas que siguen los mismos.

El desarrollo de estudios de tiempo de los procesos permitió recopilar

datos específicos del proceso tales como los tiempos de trabajo de las máquinas, los tiempos de carga y descarga, los tiempos de "set-up", la frecuencia de las averías que sufren las máquinas y los tiempos de reparación de las averías. Luego de obtener estos datos se estimaron distribuciones teóricas y sus parámetros. Hipotéticamente estas distribuciones deben corresponder a la distribución que siguen los datos obtenidos. Para verificar esta correspondencia se hicieron pruebas de corrida y pruebas de bondad de ajuste.

La figura 1 presenta la secuencia de las operaciones correspondientes al modelo del sistema actual. La secuencia se construyó a base de las operaciones actuales del sistema real. Estas operaciones se pueden observar en la ilustración del diseño de facilidades actual localizado en la figura 2. La analogía entre las operaciones del sistema real y el modelo simulado se presentan en la tabla 1.

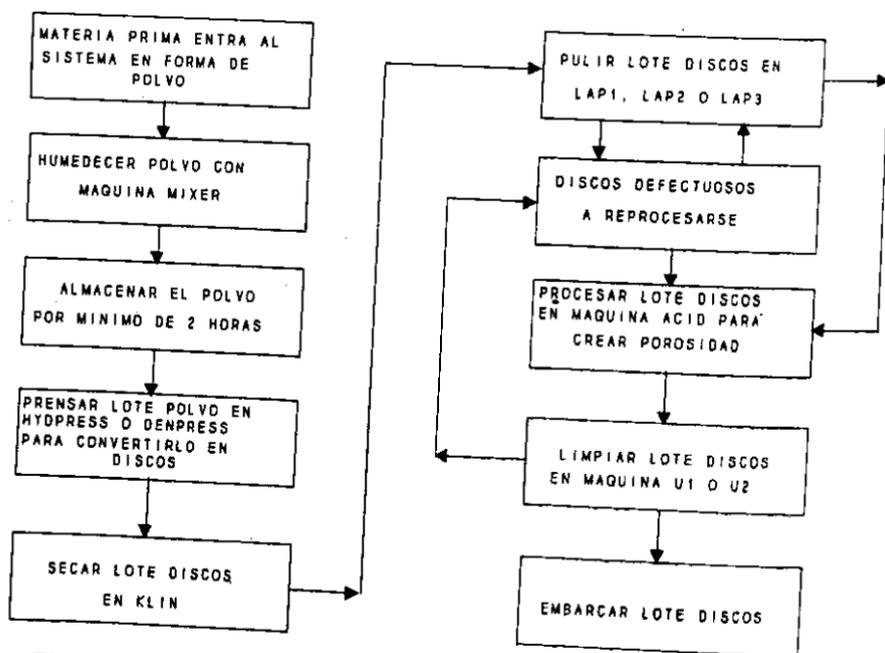


Figura 1. Diagrama de flujo de la secuencia de las operaciones ejecutadas por el modelo

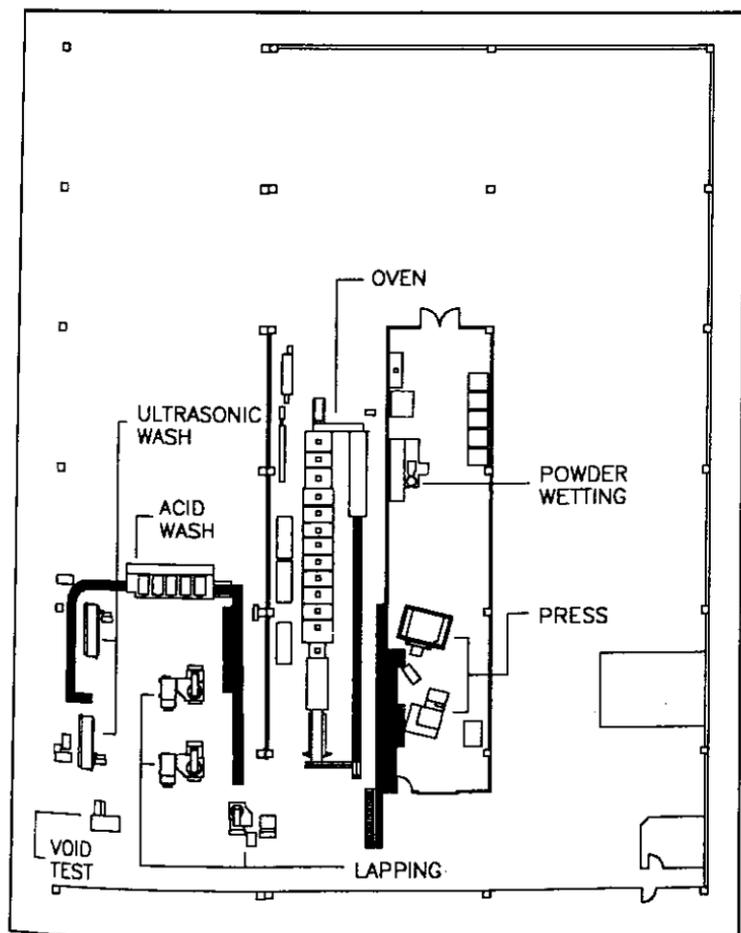


Figura 2. Diagrama de piso de la planta

## Delgado y Rivera/Diseño sistema producción

Tabla 1. Analogía de las operaciones del sistema real y el simulado

Sistema real	Modelo de simulación		
Proceso	Parte que entra	Elemento que actúa sobre la parte	Parte que sale
Powder wetting	Powder	Mixer, Totes, Lotes	Powder
Press	D3L, D24L, D2L, D16L, D125L	Hydpress, Denpress, Stacks	S3, S24, S2, S16, S125
Oven	S3, S24, S2, S16, S125	Bpress, Mbpres, Bpress2, Kiln, Sagalot	DS3, DS24, DS2, DS16, DS125
Lapping	DS3, DS24, DS2, DS16, DS125, RC3, RC24, RC2, RC16, DC3, DC24, DC2, DC16, DC125, RC3, RC24, RC2, RC16	Bkiln, Clap1, Clap2, Clap3, Lc1, Lc2, Lc3, Lap1, Lap2, Lap3, Ld1, Ld2, Ld3, Dlap1, Dlap2, Dlap3, Ii3, Ii24, Ii2, Ii16, Ii125, Mr3, Mr24, Mr2, Mr16, Mr125, Br	DR3, DR24, DR2, DR16, DR125, RDR3, RDR24, RDR2, RDR16, RS3, RS42, RS2, RS16
Acid wash	DA3, DA24, DA2, DA16, DA125, RA3, RA24, RA2, RA16, DT3, DT24, DT2, DT16, DT125, RT3, RT24, RT2, RT16	Canol, Cano2, Cano3, Lsl, Lsu Bacid, Cacid, Acidcarg, Acid, Dacid, Lacid, Lsu	DU3, DU24, DU2, DU16, DU125, RU3, RU24, RU2, RU16
Ultra-sonic wash	DU3, DU24, DU2, DU16, DU125, RU3, RU24, RU2, RU16	U1carga, U2carga, U1, U2, U1des, D3, D24, D2, D16, D125, U2des, Dultra1, Dultra2, Dultra3, Iu3, Iu24, Iu2, Iu16, Iu125, As, Lultra, Lsu	R3, R24, R2, R16, DR3, DR24, DR2, DR16, DR125, RDR3, RDR24, RDR2, RDR16

### Construcción del modelo

Para construir un modelo no es necesario tener una correspondencia de 1 a 1 entre cada elemento del sistema actual y cada elemento del modelo de simulación<sup>5</sup>. Según Law, un modelo debe diseñarse para cumplir con unos objetivos específicos y que sea válido universalmente. Nuestro modelo se orienta a cumplir con los objetivos trazados partiendo de las siguientes premisas:

<sup>5</sup> Dwyer, John and Korwin, Steve, 1985, "Honeywell Puts Simulation to Work In Multiple Arenas, *Industrial Engineering*, October, pages 33-36.

1. Siempre hay materia prima disponible para mantener el sistema activo en todo momento.
2. No hay tiempo extra ya que no pudimos concluir sobre esto por la inconsistencia en su uso.
3. Las máquinas Lap1 y Lap2 tienen el mismo tiempo de ciclo ya que provienen del mismo fabricante, tienen el mismo modelo, tipo, año y "setup".
4. Las máquinas U1 y U2 tienen el mismo tiempo de ciclo ya que provienen del mismo fabricante, tienen el mismo modelo, tipo, año y "setup".
5. Cada embarque tiene un destino asignado.
6. La asistencia de los empleados a sus respectivas ocupaciones es constante.
7. Hay mecánicos disponibles en todo momento.
8. Las operaciones pueden trabajarse en tres turnos.

#### Verificación del modelo actual

En el proceso de verificación se determina si la ejecución del modelo es cónsona con lo que se ha propuesto. Este proceso es paralelo a la construcción del modelo.

Las técnicas utilizadas en el proceso de verificación son las siguientes:

1. Discutir las ideas entre los creadores del modelo.

## Delgado y Rivera/Diseño sistema producción

2. Usar la función de "step" contenida en el simulador WITNESS para evaluar el modelo y saber su condición evento por evento.
3. La capacidad de animación del simulador para mostrar en pantalla la realidad del modelo.
4. El desarrollo de gráficas generadas por el simulador, representativas del progreso de la simulación.
5. La introducción de elementos "dummy" en el sistema con el propósito de medir la ejecución de un elemento en particular.
6. La habilidad para controlar elementos particulares del modelo permite estudiar la respuesta de cualquier componente.

### Validación

En el proceso de validación se determina si un modelo de simulación es representativo de un sistema real que se estudia. El propósito de la validación es asegurar que las personas encargadas de la toma de decisiones puedan llegar a las mismas conclusiones, ya sean derivadas de un modelo simulado o de un experimento físico con un sistema real<sup>6</sup>.

Según Law, el modelo de simulación de un sistema real complejo siempre es una aproximación. Por tal razón, no se debe hablar en términos de la validez o invalidez absoluta del modelo, sino del grado en que éste se ajusta a la realidad. La validación de un modelo de simulación debe basarse en unos criterios específicos, que deben ser los criterios que se usan en la toma de decisiones.

---

<sup>6</sup> Haider, S. and Banks, J., 1986, "Simulation Software Products for Analyzing Manufacturing Systems", *Industrial Engineering*, July, pages 68-74.

Para validar el modelo les presentamos los resultados, con datos del sistema actual, a personas relacionadas con el sistema para que nos brindaran el insumo de sus conocimientos y experiencias asociadas con los siguientes criterios: producción, "lead time" e inventarios en proceso.

Para complementar el proceso de validación, se realizó una prueba de hipótesis en la que se comparó la producción media semanal del modelo con la del sistema. Los resultados de la prueba demuestran que el modelo es una representación precisa del sistema actual. La gerencia y el personal de la compañía estuvo de acuerdo con nuestros resultados.

### **Sistemas a simularse**

En este trabajo se simulan tres sistemas de producción. El primer sistema que se simula es el que presenta la situación actual de la compañía. El segundo sistema que simulamos es el propuesto por la compañía Eléctricos de P.R. (E.P.R.) y por último simulamos el sistema propuesto por nosotros. Para todos los modelos se usó el pronóstico de ventas hecho por E.P.R. como la demanda.

El sistema propuesto por E.P.R. se basa en la introducción de equipo adicional para aumentar la capacidad para cumplir con la demanda. El equipo adicional se compone de un horno (Kiln) y una prensa de 75 toneladas (Hydpress). En la construcción de este modelo presumimos que los parámetros que controlan los procesos en los nuevos equipos son iguales a los ya existentes (entiéndase Hydpress con Hydpress2 y Kiln con Kiln2). El plan de acción establecido por la gerencia consiste en no perturbar los procesos actuales, limitando la prensa nueva a alimentar el horno nuevo y éste a su vez alimentarse únicamente de la prensa nueva.

Nuestro sistema se basa en parte en el análisis de los resultados de la simulación del modelo actual. Este análisis demuestra, entre otras cosas, lo siguiente:

## Delgado y Rivera/Diseño sistema producción

1. La producción actual es aproximadamente 20% menor que la demanda requerida
2. La acumulación excesiva de material a procesarse interrumpe el flujo de materiales
3. Acumulación excesiva del material a reprocesarse.

Luego de experimentar con nuestro modelo, encontramos que los siguientes factores componen un sistema efectivo que cumple con nuestros objetivos:

- ▶ El uso de un lote de transferencia menor al lote de producción.
- ▶ De las dos prensas existentes en la actualidad (Hydpress y Denpress), sólo se usa la Hydpress.
- ▶ La reducción de las unidades permitidas en el "buffer" que antecede a la operación de horneado (Kiln) de tal forma que se minimice el inventario en proceso sin que el Kiln se quede sin piezas para procesar.
- ▶ La eliminación de las máquinas Lap2 y Lap3.
- ▶ La utilización de dos operadores en la máquina Lap1.
- ▶ La modificación del "buffer" existente entre las operaciones de "lapping" y ácido. El número de unidades permitidas no excede la cantidad requerida para que la máquina de ácido las procese.
- ▶ La eliminación del operador a cargo de la máquina Acid; el trabajo se realiza bajo el proceso de "lapping".

- ▶ El uso de dos operadores en lugar de cuatro en la operación de limpieza por ultrasonido.
- ▶ Mixer, Hydress, Lap1, Acid, U1 y U2 trabajarán tres turnos.

Para todos los modelos se hizo una corrida de 15 semanas de duración. De las 15 semanas, cuatro de ellas constituyen el "warm-up period".

### Análisis de los resultados

La figura 3 presenta una comparación de los resultados finales de los modelos simulados. La comparación tiene como propósito crear un marco de referencia común para hacer conclusiones a base de los objetivos de nuestro trabajo.

Al comparar la producción media de unidades durante el período de simulación, se observó que para el modelo propuesto se logra un aumento de 23.22% sobre la producción actual y un 18.28% sobre el modelo de E.P.R..

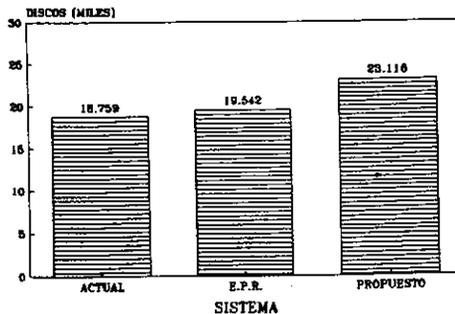


Figura 3. Número de unidades producidas por semana durante el período de simulación.

## Delgado y Rivera/Diseño sistema producción

El "lead time" medio para las unidades producidas en el modelo propuesto se calcula en 44.42 horas. Al comparar esta estadística con las 224.41 horas del sistema actual, obtenemos una reducción de aproximadamente 80.30% y una reducción de 84.30% contra el modelo E.P.R.. La figura 4 muestra estos resultados.

Debido a que el número de discos en los "buffers" tiene una relación directa con los inventarios en proceso, la comparación realizada parte del número medio de discos almacenados en los "buffers" (fig. 5). El resultado de esta comparación favorece nuestro modelo ya que se reduce este parámetro en 90.26% al compararlo con el sistema actual y en 92.03% con el sistema de E.P.R..

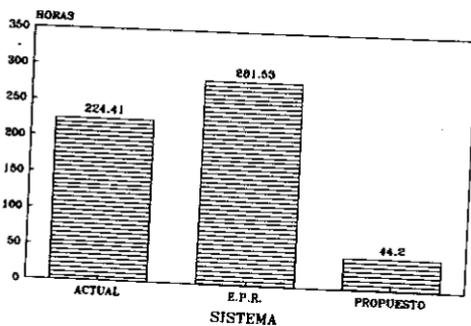


Figura 4. "Lead time" medio de las unidades producidas durante el período de simulación.

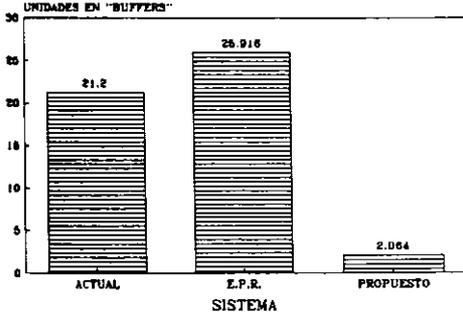


Figura 5. Número medio de unidades en los "buffers"

Del análisis de los resultados se desprende que la máquina Mixer tiene una capacidad mayor que la requerida (fig. 6) en todos los modelos y suplente todo el material necesario para que la continuidad del proceso no se interrumpa.

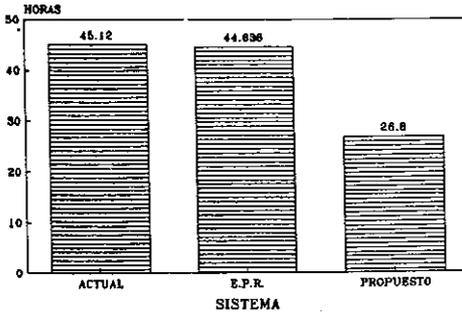


Figura 6. Uso medio de la máquina "Mixer" durante el período se simulación

En nuestro modelo se usa menos la que en los demás modelos. Es importante recalcar que nuestro modelo usa tres turnos de trabajo mientras que en los otros sistemas se trabajan dos turnos (fig. 7).

## Delgado y Rivera/Diseño sistema producción

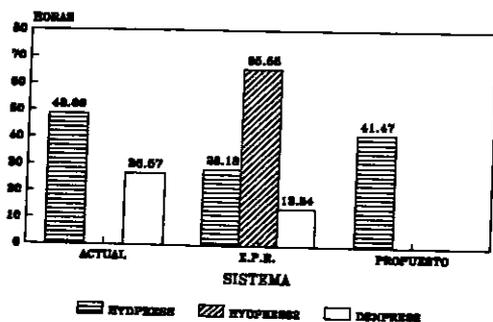


Figura 7. Uso medio de las máquinas HYDPRES, HYDPRES2 y DENPRES durante el período de simulación.

Al analizar el conjunto de operaciones del sistema se observa que la operación de la máquina Kiln es determinante en la productividad del sistema. En la figura 8 podemos notar el cambio dramático en la utilización de la máquina Kiln en el modelo propuesto.

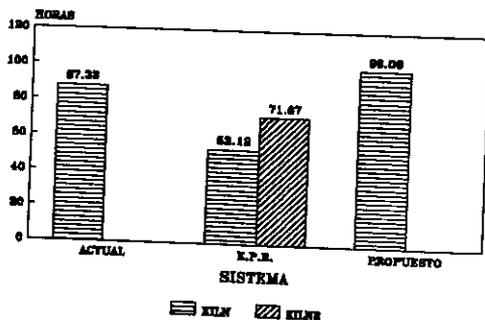


Figura 8. Cambios en el uso de la máquina Kiln

Al lograr una mayor utilización de una de las máquinas de "lapping" (fig. 9), se eliminó la necesidad de usar las restantes dos, aumentando la efectividad de la operación.

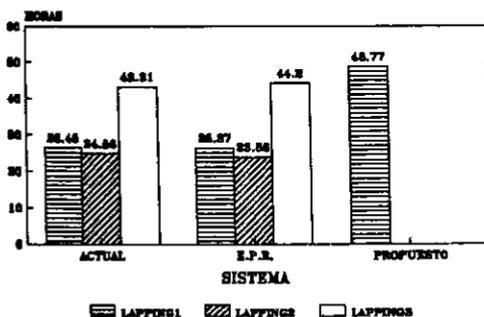


Figura 9. Cambios en la utilización de la máquina "Lapping"

Se aumentó la utilización de la máquina Acid (fig. 10), aumentando la capacidad de la operación de limpieza por ultrasonido que mantenía bloqueada la operación del ácido la mayor parte del tiempo.

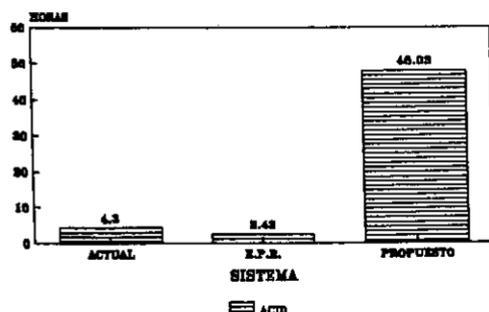


Figura 10. Aumento en el uso de la máquina "Acid"

El uso de tres turnos en esta operación en nuestro modelo es determinante en los resultados obtenidos de la utilización de las máquinas de ultrasonido (fig. 11). A pesar de que proponemos un turno adicional en esta operación, la utilización de la máquina U1 es mayor que en los otros modelos.

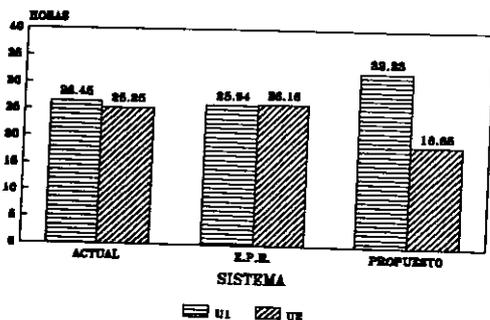


Figura 11. Utilización de la máquina de ultrasonido

Al evaluar la labor en la operación de "lapping" de nuestro modelo, se observa que el tiempo de trabajo es menor que en los otros modelos (fig. 12). Por otro lado, el establecimiento de un flujo continuo de unidades permite que la utilización de la labor en el área de limpieza sea mayor en el modelo propuesto.

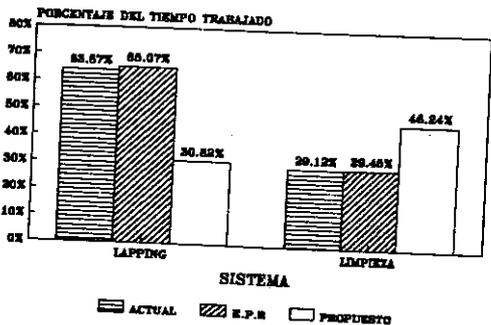


Figura 12. Tiempo de trabajo para la operación "lapping"

Del análisis de los resultados de la simulación de los modelos, podemos señalar los siguientes puntos importantes:

1. El modelo del sistema actual refleja que el sistema real no cumple con la demanda. Esta situación obedece a la interacción de los siguientes factores: baja productividad, "lead time" largos, cuantiosos inventarios en proceso, ausencia de un flujo continuo, la poca efectividad en la utilización de los turnos de trabajo para la operación de las máquinas y la búsqueda de altas eficiencias en los procesos.

Podemos entender mejor la interacción de los factores mencionados si comenzamos por analizar el efecto de los turnos de trabajo sobre el sistema. El horno (Kiln) se opera en tres turnos, 7 días a la semana. Las demás operaciones se realizan en dos turnos a la semana (excepto la máquina Denpress, que trabaja en uno) y un turno los sábados, esto ocasiona grandes inventarios de unidades en proceso. En la actividad anterior al horno se acumula inventario para alimentar a éste, y mantenerlo trabajando continuamente. La capacidad de operación de los procesos que se realizan posteriormente, disminuyen progresivamente a medida que avanza el proceso, lo que provoca acumulación de inventario. Por su parte, la acumulación de inventario aumenta el tiempo que permanece en el sistema y esto a su vez no permite satisfacer la demanda requerida. Por último, la política actual de la compañía, es que las unidades a reprocesarse se introducen al sistema cuando las máquinas de "lapping" están desocupadas. Esta situación nunca ocurre en la realidad, por lo que las unidades se acumulan continuamente.

2. El modelo de E.P.R. propone la adquisición de una prensa (Hydpress2) y un horno (Kiln2) adicional, ya que se tiene la percepción equivocada de que el sistema sufre de falta de capacidad, al no poder cumplir con la demanda. Esto agudizaría el problema existente, ya que los inventarios en proceso aumentarían aún más y la producción continuaría sin cumplir con la demanda. La acumulación de unidades a reprocesarse sería mayor, aumentando la capacidad antes de la operación de "lapping", sin cambiar la política existente.

## Delgado y Rivera/Diseño sistema producción

3. A través del estudio de tiempo que realizamos, determinamos que el horno es la restricción del proceso. De la experimentación realizada, diseñamos las operaciones de mezclado de polvo y prensado de forma tal que el horno no se quede sin material. Las operaciones de "lapping", limpieza con ácido y limpieza por ultrasonido se diseñaron de forma tal que la producción del horno no se acumule. Para mantener la continuidad del sistema de producción se ha reducido el tamaño del lote de transferencia al mínimo permitido por cada operación y se trabajan tres turnos en todos los procesos. Al reducir el tamaño del lote de transferencia, se ha logrado disminuir significativamente el tamaño de los inventarios en proceso, lo que a su vez redundará en "lead times" más cortos.

En el área de "lapping" se eliminaron dos de las tres máquinas existentes y en la restante (Lap1), los tiempos de carga y descarga se redujeron en aproximadamente un 50% al asignarle dos operadores. Estos operadores también tienen a su cargo alimentar la máquina de ácido. En las máquinas de ultrasonido hemos reducido la labor a la mitad, sin que la producción disminuya. De igual forma, la máquina Denpress se eliminó por ser innecesaria para cumplir con los requerimientos del horno.

Originalmente se planteó como uno de los objetivos específicos de este trabajo, el diseñar un sistema efectivo para el acarreo de materiales. Sin embargo, a medida que fuimos desarrollando el modelo, fue necesario mantener fuera del modelo el aspecto del acarreo de materiales. Esto se fundamentó en los planteamientos de Law y Kelton, quienes establecen que para aumentar la validez de un modelo, no se debe pretender abarcar todos los aspectos que afectan un proceso.

### Conclusión

La combinación de todos los factores que componen el modelo que proponemos resulta en un sistema que satisface la demanda, de superior operación y cumple con los objetivos específicos de este trabajo.

**Recomendaciones**

1. Realizar un estudio para establecer un mejor sistema de acarreo de materiales.
2. Establecer un plan de mantenimiento preventivo (TPM) en todas las operaciones del sistema, con especial énfasis en el horno.
3. Estudiar el impacto económico de la implantación de las dos alternativas propuestas.
4. Diseñar controles de calidad estadísticos.
5. Asignar un ingeniero industrial que se haga cargo del proceso de producción.
6. Estudiar la posibilidad de eliminar la operación de limpieza por ácido.