# ICS3213 – Gestión de Operaciones

Sección 3

Primer Semestre 2025

Profesor: Rodrigo A. Carrasco

# Avisos

- Les recuerdo que el próximo viernes 23 es la I2 del curso.
- Al igual que la vez pasada, tendremos las salas K200 a K204 y les avisaremos antes en qué sala va cada uno.
- El jueves 22 tendremos una ayudantía para la I2 durante el módulo de clases.

- El temario es:
    - Desde Pronósticos (módulo 5) hasta Proyectos y PERT (módulo 9) y los capítulos del libro asociados a cada módulo.
    - La Meta, Capítulos 16 a 26 (inclusive).
    - Casos 2 y 3, y la Tarea 2.

- Para ayudarlos con el estudio, el martes 20 tendremos control de esta materia.

# Revisión de la clase pasada

- Definimos variabilidad y la forma de medirla: el coeficiente de variabilidad.

- Vimos que una forma de modelar los problemas de variabilidad es usando las herramientas de modelos estocásticos: teoría de colas.
- Partimos por la cola M/M/1, la Ley de Little y su extrapolación a el Trabajo en Proceso.
- Cerramos entendiendo cómo modelar el efecto de las fallas en el sistema en la variabilidad de la producción.

- Ahora continuaremos explorando otras fuentes de variabilidad y extendiendo modelos más generales.

# Tiempo de setup

- Son predecibles, pero su duración puede ser aleatoria.

- Tiempo efectivo (tiempo prod.+ setup) :

$$t_e = t_o + \boxed{\frac{t_s}{N_s}}$$

número de unidades entre setups

- Varianza:

$$\sigma^2{}_e = \sigma^2{}_o + \boxed{\frac{\sigma^2{}_s}{N_s}} + \boxed{\frac{N_s - 1}{N_s{}^2} t^2{}_s}$$

- Coeficiente de variación:

$$\boxed{c^2{}_e = \frac{\sigma^2{}_e}{t_e{}^2}}$$

# Ejemplo

- 2 máquinas:
  - M1: to=1.2 hrs. $c_o$=0.5.
  - M2: to=1.0 hrs. $c_o$=0.25.
  - M1: Flexible. Sin tiempos de setup.
  - M2: 10 unidades entre setup. Tiempo setup: 2 hrs. $c_s$=0.25

- ¿Qué máquina prefiero?

# Ejemplo

- Capacidad efectiva:

$$r_{M1} = \frac{1}{t_o} = \frac{1}{1.2} = 0.833 \qquad r_{M2} = \frac{1}{t_e} = \frac{1}{1 + 2/10} = 0.833$$

$$c_e^2 = \sigma_e^2 / t_e^2$$

- Coeficiente variación:

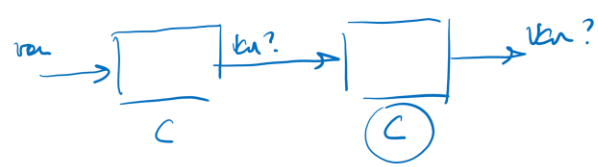
$$c^2{}_{eM1} = 0.25 \qquad c^2{}_{eM2} = 0.31$$

- Si el tiempo de setup cae a 1 hr cada Ns= 5 unidades.

$$c^2{}_{eM2} = 0.16$$

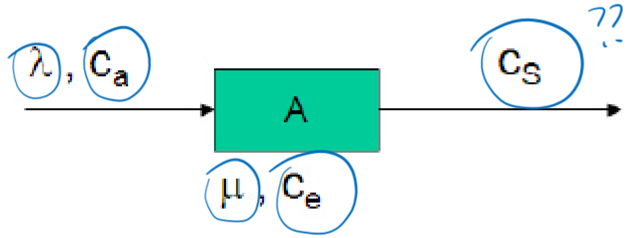
# Variabilidad en el Proceso/Flujo

- Al analizar la variabilidad en el proceso vemos al sistema como una cola.
- Cada etapa del proceso es un servidor y su variabilidad la podemos analizar usando ecuaciones de teoría de colas.
- Esto nos permite calcular el efecto que tiene en la variabilidad eventos como fallas, tiempos de puesta en marcha, etc.
- Pero en este caso tenemos que ver cómo la variabilidad de un paso afecta al siguiente.



# En sistemas productivos

- Calcular la distribución de salida puede ser muy difícil, pero es posible estimar variabilidad.




- Nos interesa estimar Cs. Se puede demostrar que:

$$\boxed{(c_S)^2} \approx \underbrace{\rho^2 (c_e)^2}_{} + \underbrace{(1-\rho^2)(c_a)^2}_{}$$

$\rho \approx 0 \rightarrow c_s^2 \approx c_a^2$

$\rho \approx 1 \rightarrow c_s^2 \approx c_e^2$

- La variabilidad se propaga. Se afecta por:
  - Variabilidad llegada.
  - Variabilidad servicio.
  - Saturación del sistema.

# Variabilidad en el Proceso/Flujo

- Al analizar la variabilidad en el proceso vemos al sistema como una cola.
- Ya vimos una cola M/M/1.
- ¿Qué pasa si ahora hay distribuciones generales?

G/G/1

# Sistema G/G/1

- Tiempo Ciclo:

$$CT_q = \underbrace{\left(\frac{C_a^{\ 2} + C_e^{\ 2}}{2}\right)}_{V} \underbrace{\left(\frac{\rho}{1-\rho}\right)}_{U} \underbrace{t_e}_{T}$$

- Medhi 1991 la derivó. Interesantes propiedades:
  - Exacta para M/M/1: Ca=Ce=1. $\longrightarrow CT_q = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot t_e = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}$
  - Depende de la Variabilidad, Utilización y Tiempo.

- Ecuación de Kingman: CT=VUT.

# Ejemplo G/G/1

- Dos máquinas en serie:
  - M1: $CVe_1^2=6.25$ y $CVa_1^2=1.0$. Tasa llegada G=2.875 trabajos/hr. Procesa 3 trabajos por hr.
  - M2: $CVa_2^2=1.0$. Ídem las tasas.

# Ejemplo G/G/1

- Dos máquinas en serie:
  - M1: $CVe_1^2$=6.25 y $CVa_1^2$=1.0. Te=20 min. Tasa llegada G=2.875 trabajos/hr. Procesa 3 trabajos por hr.
  - M2: $CVa_2^2$=1.0 Te=20 min. Ídem las tasas.

$$\rho = 0.9583$$

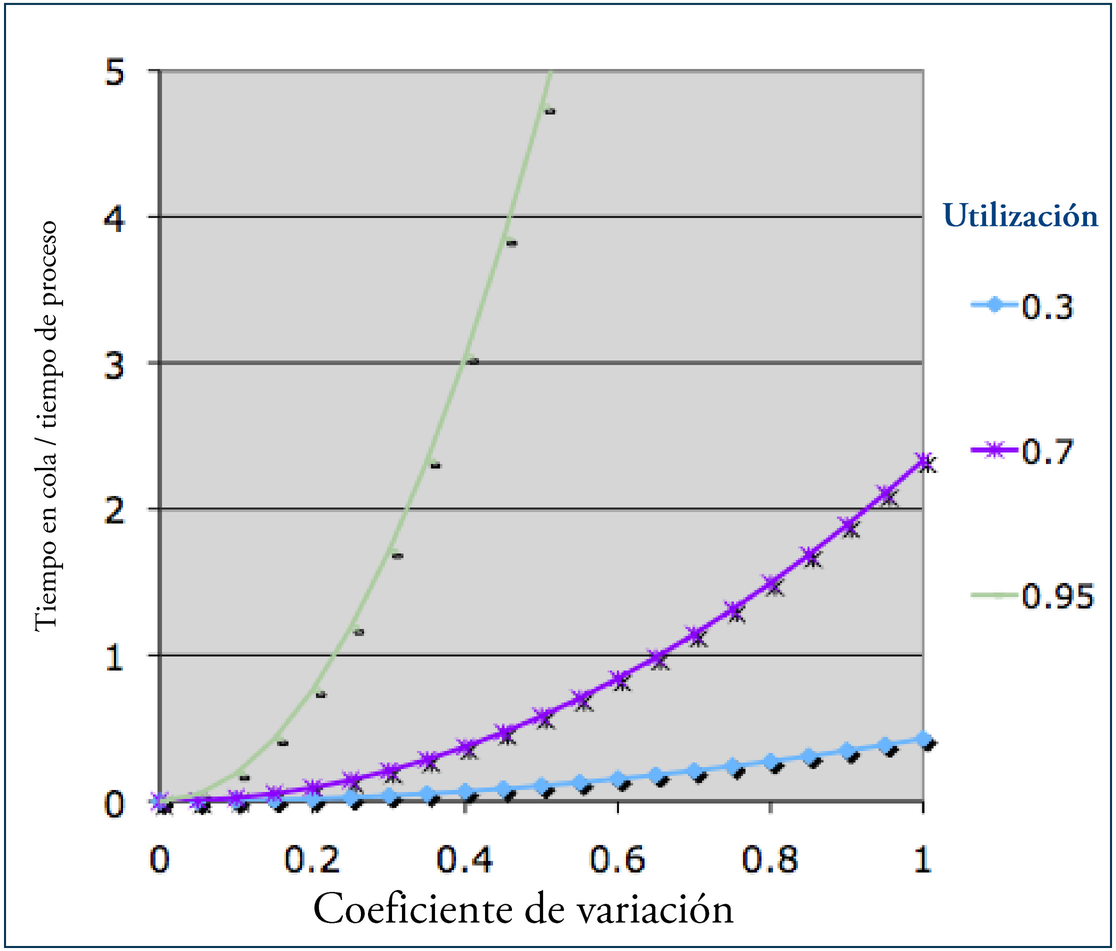
$$CT_{q1} = \underbrace{\left(\frac{1+6.25}{2}\right)}_{V}\underbrace{\left(\frac{0.9583}{1-0.9583}\right)}_{U}\underbrace{20}_{T} = 1667.5\, min$$

$$C_{s2}{}^2 \approx C_e{}^2\rho^2 + C_a{}^2(1-\rho^2) = 6.25 \quad 0.9583^2 + 1.0 \quad (1-0.9583^2)$$
$$= 5.82$$

$$CT_{q2} = \underbrace{\left(\frac{1+5.82}{2}\right)}_{V}\underbrace{\left(\frac{0.9583}{1-0.9583}\right)}_{U}\underbrace{20}_{T} = 1568.97\, min$$

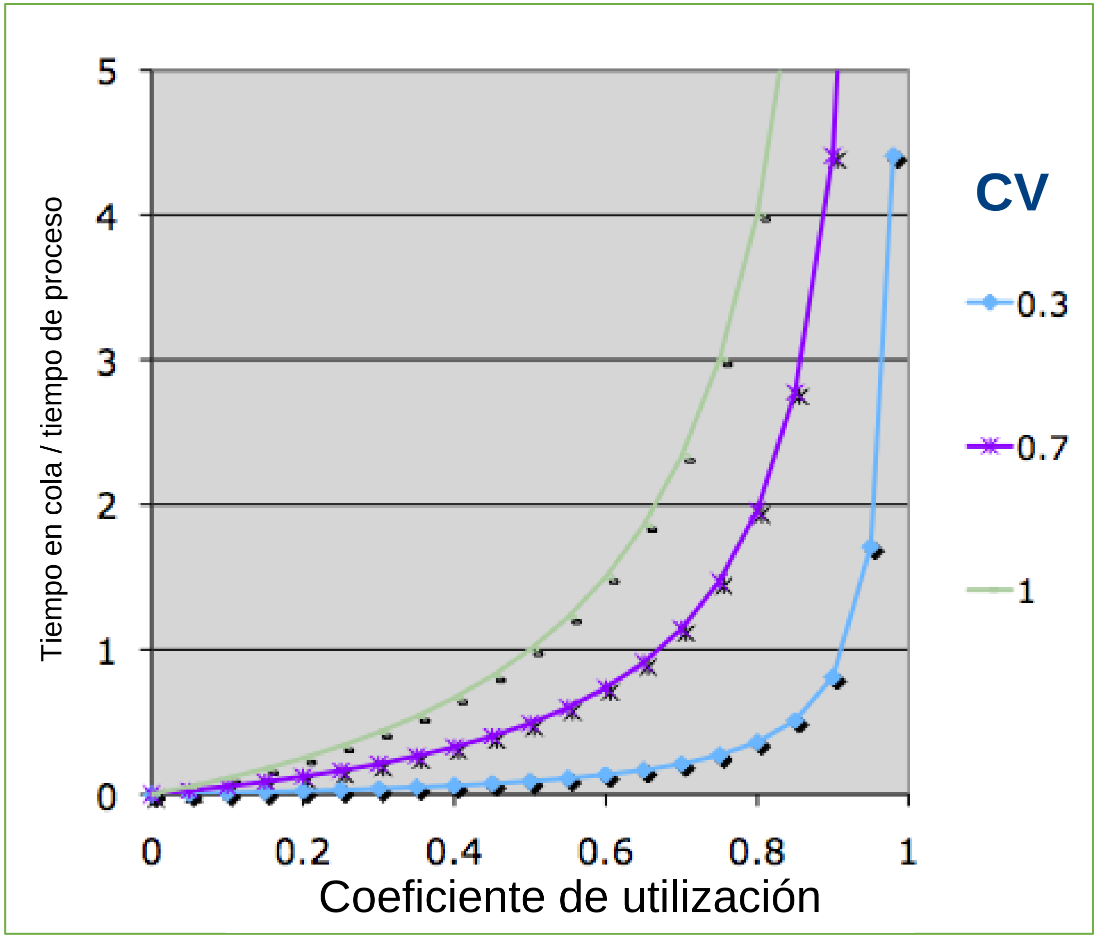
# Control de la variabilidad

- Se requieren grandes reducciones de variabilidad si la utilización es alta
- Esta es la motivación detrás del enfoque 6-Sigma



# Control de la utilización (sobrecarga)

- Para cualquier nivel de variación, algún nivel de utilización hace que el tiempo en cola explote.
- Esto conecta *muri* y *mura* de TPS.
- Con frecuencia, un pequeño cambio marca una diferencia drástica



# Capacidad finita: M/M/1/b

- La capacidad de espera es limitada a *b* clientes. Hay bloqueo.
- Si llega y cola está llena abandona.
- Resultado:

$$L = \frac{\rho}{1-\rho} - \boxed{\frac{(b+1)\rho^{b+1}}{1-\rho^{b+1}}}$$

- Tasa efectiva de clientes:

$$\lambda' = \lambda \boxed{\left(\frac{1-\rho^{b}}{1-\rho^{b+1}}\right)}$$

# Múltiples servidores: M/M/c

- Factor de congestión:

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu}$$

- Resultado:

$$L_q = \frac{\rho}{1-\rho} \times \boxed{Prob(N > c)}$$

- N es el número de clientes en el sistema
- Espera:

$$W_q = \frac{\rho}{\lambda(1-\rho)} \times \boxed{Prob(N > c)}$$

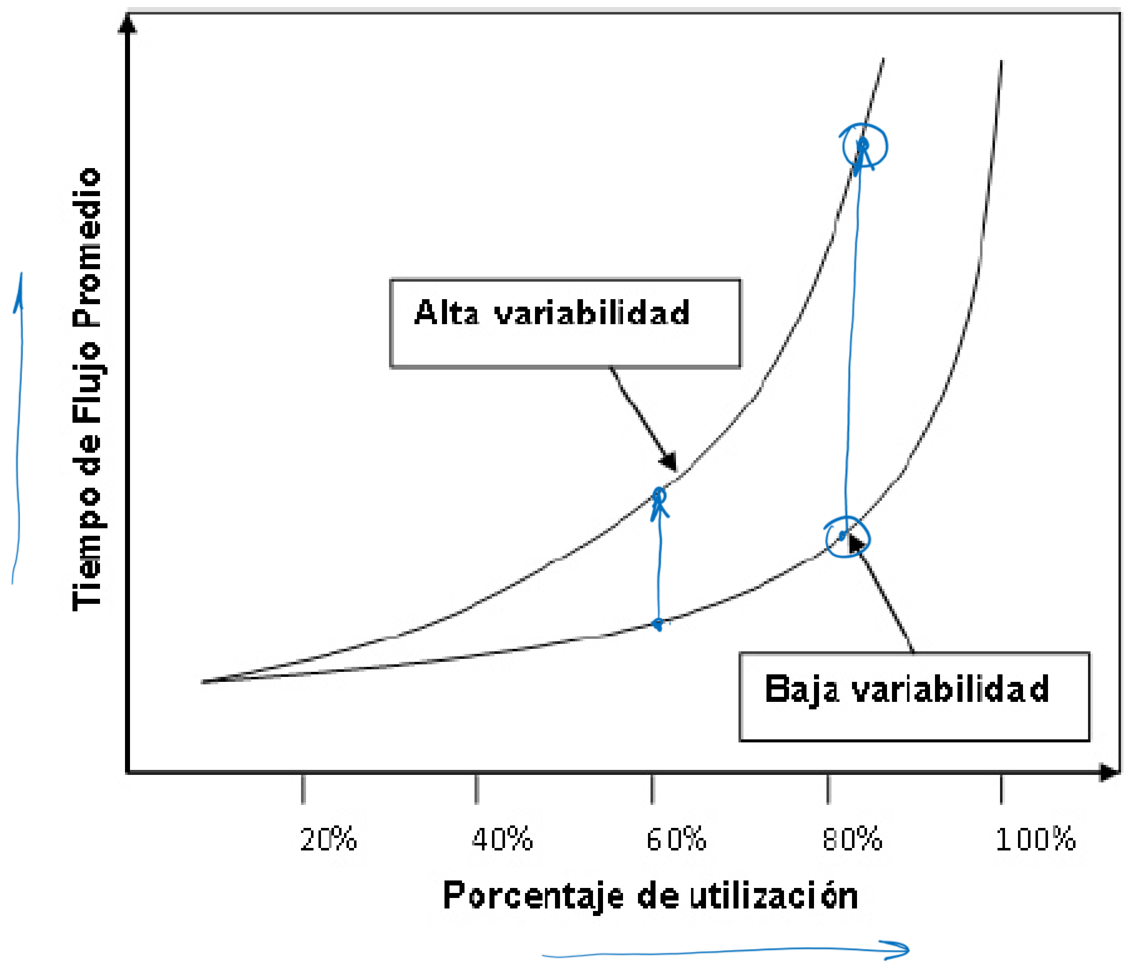
# Usos y limitaciones

- Se utilizan mucho en el ámbito de servicios.
- Ejemplos:
  - Disney.
  - Call-center.
  - Supermercados.

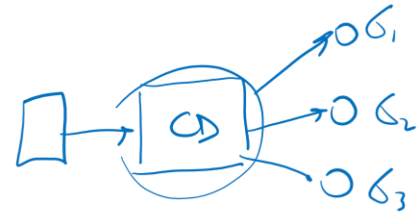
- El modelo Markoviano o de Poisson puede no ser el mejor para modelar situaciones productivas. ¿Por qué?

- Distribuciones generales.

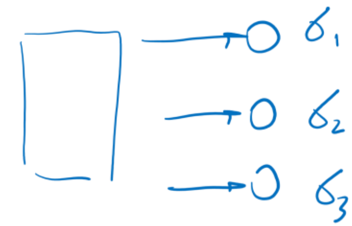
# En general


Tiempo de Flujo Promedio
Alta variabilidad
Baja variabilidad
20%
40%
60%
80%
100%
Porcentaje de utilización

# Pooling de la variabilidad




- Pooling es→ Agregar, juntar.



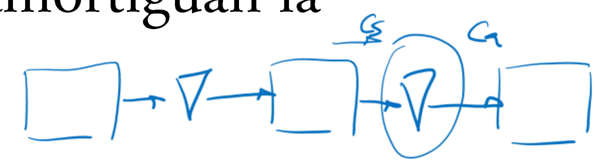

- Si agregamos. Ejemplo.
- Formas:
  - Batch.
  - Unir inventario.
  - Compartir la espera. Ej. Jumbo.
- Objetivo es disminuir la variabilidad.

# En sistemas productivos

- El buffer de capacidad finita mejora el performance para los clientes que ingresan al sistema.

- La presencia de un buffer reduce el throughput del sistema y este efecto aumenta la variabilidad.

- En sistemas interconectados los buffers amortiguan la propagación de la variabilidad.

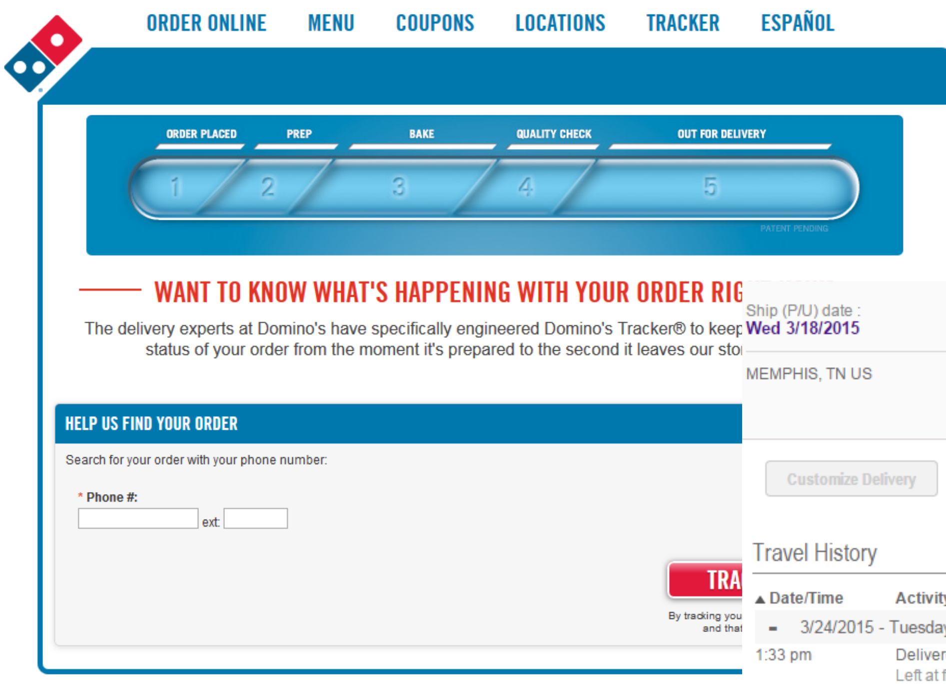


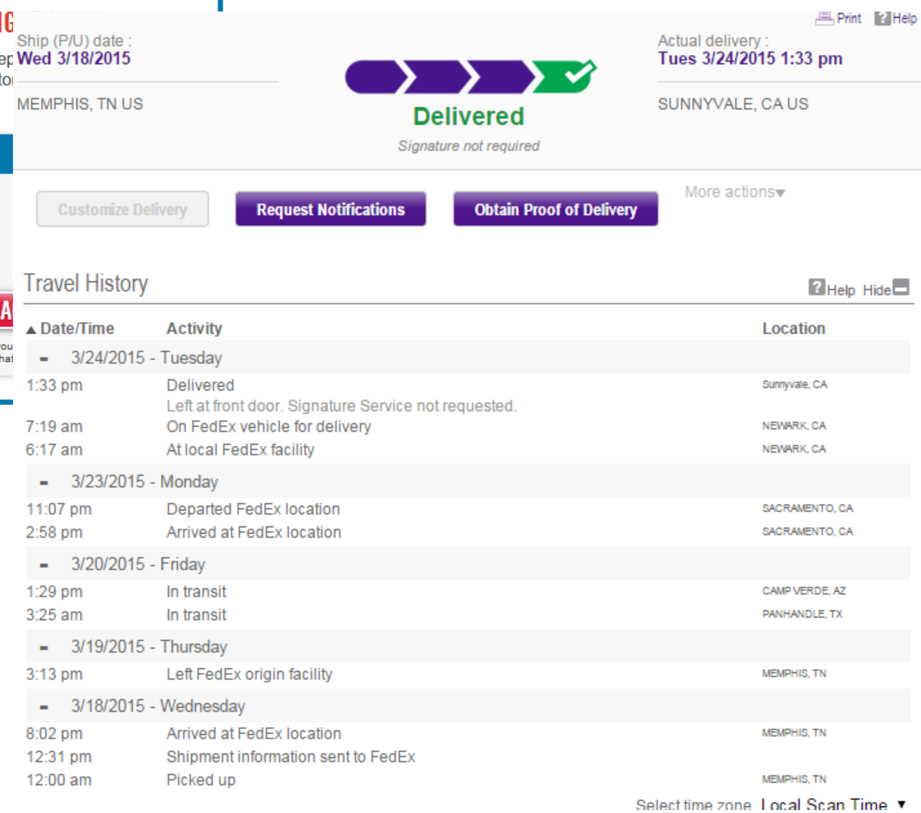

- Mejorar el throughput: Aumentar el tamaño del buffer o reducir variabilidad.

# Psicología de líneas de espera

- Tiempo ocioso se percibe más largo que tiempo ocupado.
- La ansiedad hace que las esperas parezcan más largas.
- Esperas inciertas parecen más largas que las conocidas.
- Esperas inexplicadas parecen ser más largas que aquellas con explicación.
- Esperas injustas se hacen más largas que esperas justas.
- Mientras más valioso el servicio, más tiempo estará dispuesto a esperar el cliente.
- Esperas individuales se perciben más largas que esperas grupales.

# Dar visibilidad



# Sugerencias para administrar las colas

- Determine un tiempo aceptable para sus clientes.
- Trate de desviar la atención de sus clientes cuando esperan.
- Informe a sus clientes qué es lo que deben esperar.
- Mantenga fuera de la vista de sus clientes a los empleados que no los están atendiendo.
- Segmente a los clientes.
- Capacite a sus servidores para que sean cordiales.
- Anime a los clientes para acudir durante períodos de poca actividad.
- Tenga la perspectiva a largo plazo de deshacerse de las colas.

# Conclusiones

- Todos los sistemas tienen variabilidad. Administrarla.
- El coeficiente de variación es la mejor forma de medir la variabilidad.
- La variabilidad se propaga. Látigo.
- El tiempo de espera es el mayor componente del tiempo de ciclo.
- Si queremos reducir el CT, limitar el buffer. Reducimos el TH. Eq. Little.
- Pooling ayuda a disminuir la variabilidad.