

Modelado y Simulación Dinámica de los Efectos de los Tiempos de Demora en una Línea de Estampado Utilizando MATLAB

Lisaura Walkiria Rodríguez Alvarado, Eduardo Oliva López

Instituto Politécnico Nacional, Esime Zacatenco, Doctorado en ciencias de Ingeniería Mecánica, Distrito Federal, México

lrodrigueza1010@alumno.ipn.mx, eoliva@ipn.mx

Resumen. En esta publicación se presenta el desarrollo de un modelo computarizado de Dinámica de Sistemas (DS) y su aplicación en una empresa metal-mecánica. El modelo desarrollado se ha aplicado hasta ahora a una sección crítica de la planta de fabricación (línea de estampado) del ramo automotriz. Los resultados obtenidos muestran que: los tiempos de paros no programados (sin registro) ocasionan retrasos significativos en el flujo de producción, generando el incumplimiento de las órdenes de producción y de los tiempos de entrega. Ante el inconveniente de adquirir un software especializado para este tipo de simulación, se está desarrollando una nueva versión basada en MATLAB que se encuentra en un 50% de avance.

Palabras claves: Modelo computarizado, simulación, dinámica de sistema, proceso

1 Introducción

Al considerar un sistema de producción como un conjunto de variables interrelacionadas entre sí (información, insumos, costos, gastos, ingresos, tiempos de operación, niveles de inventarios entre otras), es posible analizarlo mediante la metodología de DS. Ya que esta permite el modelado, simulación y control de sistemas dinámicos complejos [1]. La aplicabilidad de la simulación digital en los sistemas de manufactura, ha estado dominada por la producción dinámica [2], la planificación y control de la producción [3], el análisis de capacidad de producción [4],[5]; los requerimientos de materiales [6] y las herramientas de la manufactura esbelta [7]. Es decir, la aplicación de la DS se ha enfocado al análisis de: comportamiento del sistema, análisis de escenarios de producción, evaluación de políticas administrativas y análisis de la capacidad de producción.

En este trabajo se describe un modelo de un sistema de producción enfocado al análisis de los efectos de las demoras o retrasos (delays). Estos efectos son ocasionados por los tiempos de paros no programados (sin registro) en el proceso de estampado de una empresa de autopartes. Para su simulación, se empleó la metodología de la

DS, desarrollando una plataforma en el software MATLAB. La plataforma posee una interfaz gráfica, para lo cual se utilizó la herramienta GUIDE.

Este software fue seleccionado por las ventajas de su capacidad para resolver algoritmos numéricos y por sus herramientas de interfaz gráfica. Estas características responden a los requerimientos de simulación del objeto de estudio, permitiendo diseñar una plataforma de simulación personalizada (no adaptada). Otra de las razones por las cuales se optó por este software en lugar de usar uno de los disponibles comercialmente como Vensim o Powersim, es debido al alto costo de adquisición que representan estos software comerciales. Para indagar más en las diferentes herramientas de simulación especializadas en DS, se recomienda al lector leer el trabajo realizado por Andrade y otros [8].

2 Caso de estudio

El área de interés para este estudio es el área de estampados de una empresa de autopartes, dedicada a la fabricación de componentes automotrices de acero y sus aleaciones. Esta línea permite la continuidad del ciclo productivo generando producto semiterminado y producto final, y es la que presenta mayor oportunidad para mejorar la programación de la producción. La línea de estampados consta de 15 prensas, 8 de ellas trabajan de modo manual y 7 trabajan en forma progresiva, en la cual se fabrican alrededor de 700 números de parte en los procesos de corte, embutido o formado.

3 Problemática

El incumplimiento de las órdenes de producción se encuentra vinculado, además de la capacidad de producción de la línea, al aprovechamiento efectivo del tiempo y el desglose de actividades que debe realizar cada trabajador. En la tabla 1 se presentan las generalidades de la situación actual y los factores de interés que determinan la incidencia de los mismos en el comportamiento del proceso.

Tabla1. Generalidades de la situación actual y factores de interés.

Estándar	Capacidad	Paros	Programa
El estándar actual no corresponde al estándar de trabajo (pz/min) del proceso.	La capacidad de la línea no responde a la necesidad demandada.	Se registran una serie de tiempos de paros no contemplados dentro del proceso.	La secuencia del programa de producción y su planificación no corresponde a la situación actual de la línea.
-Tiempo real del ciclo de producción (pz/min). -Actividades anexas al proceso, no registradas.	-Capacidad necesaria para el cumplimiento del programa.	-Tiempo de montaje y desmontaje -Tiempo de proceso y preparación de la pieza -Factor de nivelación.	-Carga de trabajo. - Disponibilidad de material, herramienta y equipo.

Los datos presentados anteriormente (que se derivan de los factores de interés) son los que caracterizan al sistema de producción (como fuente de información) y se generan del análisis de la problemática actual de la línea y determinan su comportamiento dinámico. A partir de esta información se desarrolla el modelo de DS mediante la plataforma desarrollada en el software MATLAB.

La metodología de la DS consta de las siguientes etapas: definición del sistema, conceptualización, formalización y comportamiento y evaluación, [9], [10]. El modelo de simulación diseñado en MATLAB, permitió integrar las bases de datos previamente creadas en Microsoft EXCEL. Para el diseño de la plataforma de simulación se utilizó el método en espiral propuesto por Barry Boehm [11].

4 Diseño del modelo

4.1 Conceptualización de las variables del sistema

Variable de Tipo Demora. Representa el tiempo que transcurre entre una causa y sus efectos, es decir, algunos eventos de los procesos se retrasan en su ocurrencia.

- Retraso en el flujo de producción (*RFp*). Esta variable corresponde al tiempo (minutos) destinado para realizar actividades anexas al proceso, las cuales no se registran actualmente: preparación de la pieza, limpieza por la rebaba generada, tiempo del proceso y acomodo de piezas.
- Ajuste para trabajo en proceso (*ATP*). Representa la demora que corresponde al tiempo (minutos) de los paros programados, como son el montaje, tiempo de limpieza, tiempo personal y desmontaje.

Variables de Tipo Flujo. Este tipo de variable simboliza el cambio de estado de las variables de nivel durante un periodo de tiempo.

- Flujo de entrada (*Fp*). Representa la entrada de datos proveniente de la demanda o pedido solicitado al ciclo de producción, influenciada por el valor de la variable de la primera demora *ATP*. Su ecuación está determinada por una función *Tren de Pulso*, es decir, que cada entrada representa una orden de pedido diferente.

$$Fp = \text{Pulse Train} (ATP, Pd, F, Fin) \quad (1)$$

Pd, corresponde a la variable: tiempo de producción en función de la cantidad demandada (uds). **F**, es la frecuencia, representada por la cantidad de carga de trabajo determinada por la producción deseada y su duración (min). **Fin**, Tiempo de culminación. Corresponde al tiempo de finalización de la última carga programada.

- Flujo de salida (*Fpt*). Este flujo de salida representa la salida del flujo productivo una vez que ha sido afectada por la demora *RFp*. La ecuación 2 representa el comportamiento del flujo de salida.

$$F_{pt} = \text{Smooth}(F_p, RF_p) \quad (2)$$

Esta ecuación se traduce de la siguiente manera en el software Matlab.

$$F_{pt_{t+1}} = F_{pt_t} + (F_{pt} - F_{pt_t}) / RF_p \quad (3)$$

Variables de Tipo Nivel. Son los recipientes, las variables que acumulan magnitudes con el tiempo. Estas definen la situación en que se encuentra el sistema.

- El nivel principal (TP). Representa la diferencia acumulada de los flujos de entrada y salida (F_p , F_{pt}) y corresponde a la variable principal. Este nivel representa la ecuación principal del sistema, ya que es donde se analiza la acumulación de piezas sin producir debido a los efectos de las demoras.

La ecuación 4 describe el comportamiento de la variable de nivel TP .

$$TP = \text{INTEG}(F_p - F_{pt}, TP_{\text{inicial}}) \quad (4)$$

Donde, la constante TP_{inicial} es el valor de la variable TP en el instante inicial de la simulación.

- Las variables de nivel NF_p y NF_{pt} . Representan la acumulación, en el tiempo, del comportamiento de los flujos de entrada y salida respectivamente. Las ecuaciones que definen estas variables de nivel son las siguientes, donde los valores NF_p_{inicial} y NF_{pt}_{inicial} son los valores de las variables NF_p y NF_{pt} en el instante inicial de la simulación.

$$NF_p = \text{INTEG}(F_p, NF_{p_{\text{inicial}}}) \quad (5)$$

$$NF_{pt} = \text{INTEG}(F_{pt}, NF_{pt_{\text{inicial}}}) \quad (6)$$

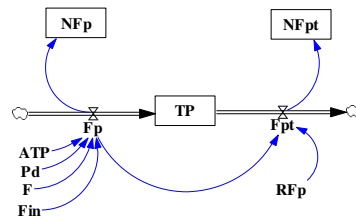


Fig. 1. Modelo dinámica del comportamiento de una prensa.

La interrelación de las variables explicadas anteriormente y el comportamiento dinámico de una prensa se resumen en la Figura 1. La secuencia se repite igual para las 15 prensas que integran el sistema. Se puede observar que la integración de los flujos afectan la variable principal TP , y las demoras el comportamiento de los flujos.

4.2 Desarrollo de la plataforma de simulación en el software matlab

Para el desarrollo del programa se recurrió a la herramienta de programación de ambiente gráfico de Matlab (GUI) y su plataforma de programación. El programa está estructurado en dos módulos, los cuales se dirigen desde la pantalla principal. A continuación se explica a detalle el desarrollo e integración de los módulos.

Módulo 1: Programa de Producción. Este módulo brinda un escenario real a ser evaluado mediante la programación de la producción. En la Figura 2, se muestra la pantalla principal que representa la interfaz entre el operador y el software creado, seguido del detalle de los elementos que integran dicha pantalla. Posteriormente se presenta el diagrama de flujo (ver Figura 3.) que integra la secuencia de programación realizada para obtener los resultados buscados. Cada etapa del diagrama está referenciada con cada uno de los elementos que se muestran en la pantalla principal de la interfaz, declaración de variables y origen de los datos de alimentación.

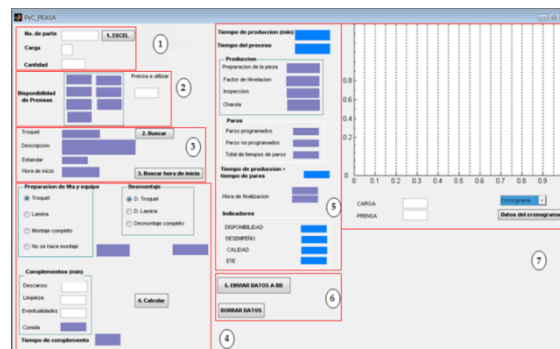


Fig. 2. Módulo 1: Programación de la Producción.

1. Información adicional. Registra el número de parte, la carga y la cantidad a producir. Es enviada a un archivo de Excel para procesar los demás datos.
2. Disponibilidad de prensas. Muestra la lista de prensas disponibles para procesar la pieza programada.
3. Requerimientos. Muestra los requerimientos necesarios para producción: herramienta, tipo de herramienta y estándar de producción y hora de inicio.
4. Paros programados. Estos corresponden a: preparación de la herramienta, desmontaje, complementos. La pausa para la comida, se calcula automáticamente.
5. Indicadores e información del proceso. El programa realiza el cálculo de indicadores, información adicional como paros no registrados. El programa realiza el cálculo de indicadores, información adicional como paros no registrados en el proceso, tiempo de producción, tiempo del proceso, paros no programados, hora de finalización y finalmente los indicadores de desempeño.
6. Registro de bases de datos. Esta etapa corresponde al envío de la información generada en el programa a una base de datos en Excel.

7. Gráficas. Consulta de cronograma, indicadores por prensa y total línea, paros registrados.

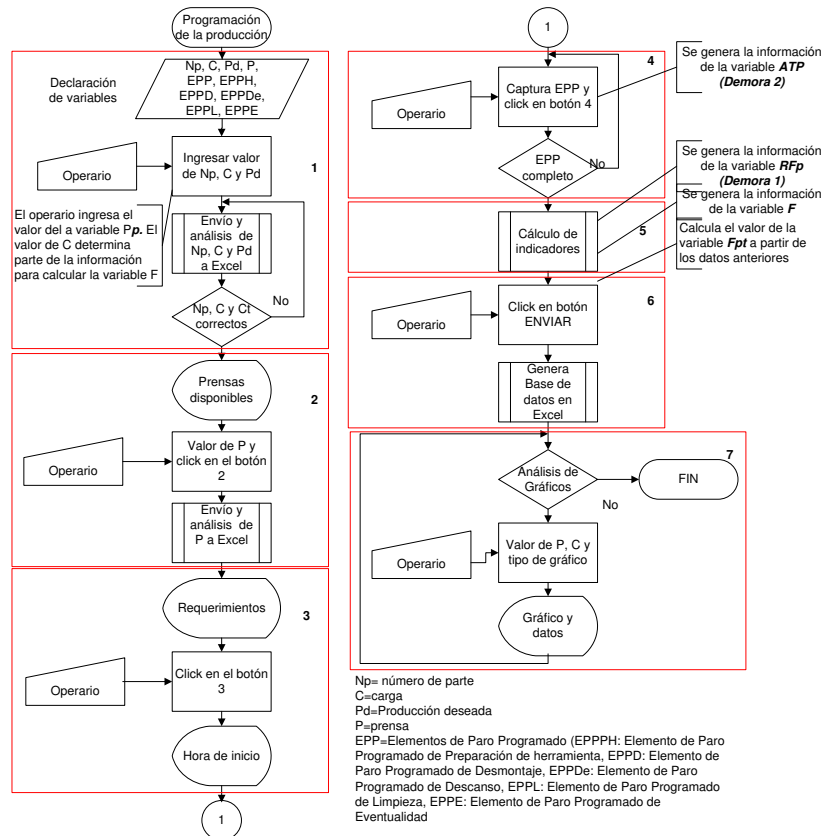


Fig. 3. Diagrama de flujo de la secuencia de programación del módulo 1.

Módulo 2: Simulación. El módulo 2 representa la plataforma de simulación, en el cual el usuario interactúa con los datos registrados en el módulo 1. En la Figura 4, se muestra la pantalla principal del programa y en la Figura 5 se muestra el diagrama de flujo de la secuencia de programación.

Tabla2. Elementos que integran la pantalla de interfaz

No.	Elemento	Descripción
1	Análisis del comportamiento de las demoras	El usuario puede interactuar con esta gráfica para realizar el análisis de la demora en el proceso de producción ocasionada por los diferentes tiempos de paros.
2	Análisis del comportamiento de los niveles	El usuario puede interactuar con el análisis de los niveles generados por los flujos de entrada y salida del proceso. De igual manera realizar el análisis de la cantidad de piezas que no se producen por los efectos de la demora.



Fig. 4. Módulo 2: Simulación.

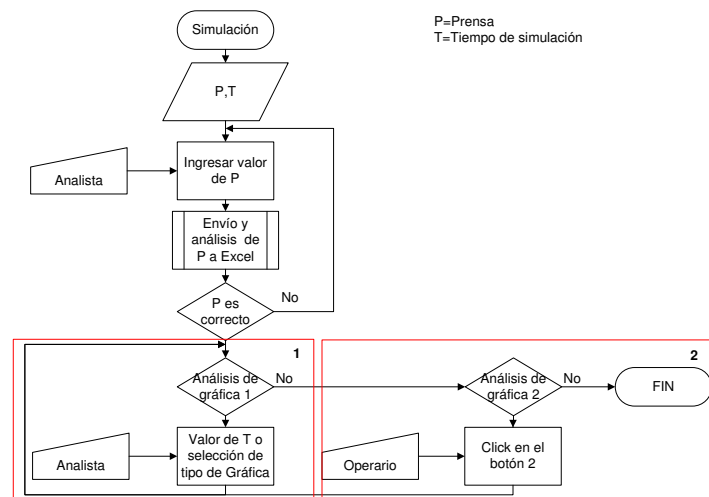


Fig. 5. Diagrama de flujo de la secuencia de programación del Módulo 2.

5 Simulación y evaluación

Los resultados de las *corridas* de simulación fueron validados contra datos reales de la producción en la línea de estampado, y también contra los resultados obtenidos con un demo del software especializado en DS, VENSIM, con el objetivo de verificar la validez de las ecuaciones y la veracidad de los resultados obtenidos. Se realizaron diferentes escenarios de simulación, con un universo amplio de situaciones posibles, con el proceso en operación de la línea de estampado. Se ilustra el caso más representativo. Para tal efecto se seleccionó el comportamiento de programación de la prensa

834 (prensa de 120 toneladas con procesamiento de piezas en forma automática y semiautomática).

Table3. Programación de la prensa 834

No. de Parte	Cantidad (uds/pza)	Tiempo de producción (min)	Paros programados (min)	Paros no programados (min)
Np	Pd	C,F	RFp	ATP
1ES9949 2p	2000	417	100	99
CM-3909 1P	1000	30	55	4
CM-3911 2P	2000	313	63	90
1ES1638 1P	1300	163	55	16

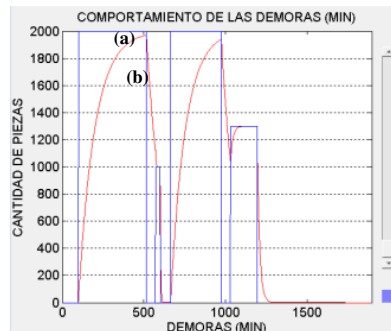


Fig. 6. Comportamiento de los flujos de entrada (a) y salida del sistema (b).

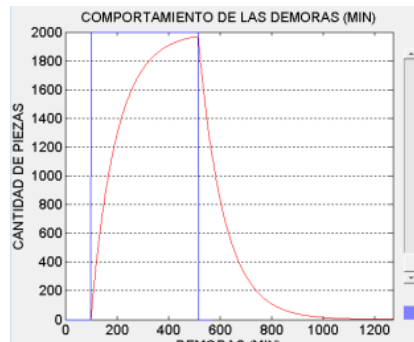


Fig. 7. Comportamiento del flujo de entrada y salida de la carga 1 de la prensa 834.

En la Figura 6, se puede ver la diferencia de flujos de entrada y salida. Se puede observar que en la demora ocasionada en la carga de trabajo 1, retrasa el flujo de producción de la siguiente carga, es decir, genera un incumplimiento en esa orden de producción. De acuerdo al comportamiento teórico, la programación realizada de la prensa 834 debería concluir en el minuto 1200 (20 horas después de iniciado el proceso). Sin embargo, las demoras ocasionan un retraso que extiende la producción hasta el minuto 1300, es decir casi dos horas de retraso. En la Figura 7, se observa el com-

portamiento de las demoras en el flujo de salida y entrada para la carga 1. En este caso, el ciclo debió concluirse en el minuto 500, sin embargo debido a las demoras, el proceso de producción de la pieza se extiende hasta el minuto 1100 aproximadamente.

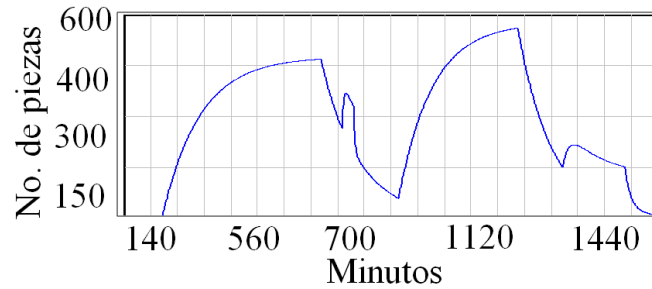


Fig. 8. Comportamiento de la variable de nivel TP.

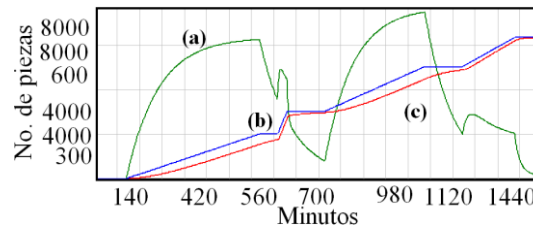


Fig. 9. Comportamiento de las variables de nivel (TP (a), NFp (b), NFpt (c)) en el tiempo.

La Figura 8, muestra el resultado de la simulación, que permite analizar la cantidad de piezas que se han dejado de hacer a consecuencia de las demoras registradas. Para la carga 1: 453 piezas, Carga 2: 400 piezas, Carga 3: 590 piezas y, finalmente, para la Carga 4: 170 piezas; aproximadamente. En la Figura 9, se observa el desfase en el tiempo de la variable *NFpt* con relación a la variable *NFp* en el tiempo, esto se debe a la influencia de los valores de las demoras explicadas anteriormente. La variable de nivel *TP*, representa la cantidad de piezas acumuladas retrasadas, es decir la diferencia entre la cantidad de las piezas teóricas a producir y las que realmente se producen. Esta diferencia de producción es el resultado de la producción con demoras.

6 Conclusiones

Los resultados obtenidos de las corridas de simulación del funcionamiento de la prensa 834, muestran que el modelo desarrollado representa satisfactoriamente la operación real de la prensa y también proporciona resultados muy aproximados a su funcionamiento actual. También se observa que el comportamiento de las demoras tiene gran incidencia en el comportamiento del proceso de producción de la línea de estampados. Se determinó que los tiempos de paros no registrados son la principal fuente de origen de las demoras del proceso que, al no ser considerados en programación normal, ocasionan que se retrase el flujo de materiales. El principal efecto de éste

se refleja en la cantidad de piezas que son dejadas de producir en el periodo. De igual manera las gráficas de Niveles presentadas en la Figura 9 permiten hacer un análisis más crítico de la situación, puesto que se visualizan las diferencias entre los flujos de producción real y la programada.

Este análisis fue realizado mediante un modelo computarizado desarrollado en el software Matlab, aplicando la metodología de DS. El diseño y construcción del modelo en este tipo de software presenta ventajas con relación a los softwares comerciales existentes, ya que se diseñó de acuerdo a las necesidades y requerimientos de la situación, es decir se creó un programa personalizado. La imposibilidad financiera de adquirir la licencia de los softwares especializados fue un obstáculo práctico. La integración de la metodología de la DS y el desarrollo de su modelo en Matlab, evidencian la efectividad de este modelo para el análisis del comportamiento dinámico de sistemas productivos. Actualmente se está desarrollando un modelo completo que incluye otras variables de interés, como análisis de las incidencias de las demoras en tiempos de entrega y retrasos en el flujo de comportamiento de materia prima, con un enfoque de rentabilidad sobre la inversión. Esto permitirá analizar la situación de la línea de producción para la toma de decisiones a nivel estratégico.

Referencias

1. Meyers, R. A.: *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. New York: Springerscience+Businessmedia, (2009).
2. Wiendahl, H.-P., & Breithaupt, J.-W.: Modelling and controlling the dynamics of production systems. *Production Planning & Control: The Management of Operations* , 389-401, (1999).
3. Georgiadis, P., & Michaloudis, C.: Real-time production planning and control system for job-shop manufacturing: A system dynamics analysis. *European Journal of Operational Research*. Volume 216, Issue 1, , 94-104, (2012).
4. Ruiz, U. R., Muñoz, M. A., Framian, J. M., Moreu, P., Leon, J. M., & Duran, M.: Modeling and Simulation of a Manufacturing Line in an Automotive Components Plant. 20 th International Conference of the System Dynamics Society, Palermo, Italy, (2002).
5. Towill, D.: Dynamic analysis of an inventory and order based production control system. *International Journal of Production Research* , 671-687, (1982).
6. Morecroft, J.: A SYSTEMS PERSPECTIVE ON MATERIAL REQUIREMENTS PLANNING. *Decision Sciences*. Volumen 14. Issue 1. , 1-18, (1983).
7. Deif, A.: Computer Simulation to Manage Lean Manufacturing Systems. 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology. Vol 6 , 677-681, (2010).
8. Andrade Soza, H. H., Lince Mercado, E. d., Hernández Cuadrado, A. E., & Monsalve Quintero, A. J.: Evolución: Herramienta Software para Modelado y Simulación con Dinámica de Sistemas. *Revista de Dinámica de Sistemas*. Vol 4, (2010).
9. Martin, J.: *Theory and Practical Exercises of System Dynamics*. Barcelona: J.M. García, (2006).
10. Forrester, J. W.: *Industrial Dynamics*. New York: MIT Press and Wiley, (1961).
11. Boehm, B.W., C. Abts, A.W. Brown, S. Chulani, B.K. Clark, E. Horowitz, R. Madachy, D. Reifer, B. Steece.: *Software Cost Estimation with COCOMO II*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs Boehm, Barry W., TRW Defense Systems Group (1988), *A Spiral Model of Software Development and Enhancement*, (2000).