

ANÁLISIS MULTIFACTORIAL DE VARIANZA DEL DESEMPEÑO DE UN JOBSHOP DINÁMICO CON DUE DATES BASADO EN REGRESIÓN MÚLTIPLE

MULTIFACTORIAL ANALYSIS OF VARIANCE OF DYNAMIC JOBSHOP PERFORMANCE WITH DUE DATES SETTING BY MULTIPLE REGRESSION

MARCOS NEIRA RODRIGUEZ ¹
EDUARDO SALAZAR HORNIG ¹

Universidad de Concepción, Concepción, Chile

RESUMEN

Se realiza un análisis de varianza multifactorial del desempeño global de un sistema de producción tipo taller con centros de trabajo de multicapacidad (flexible jobshop), considerando los factores regla de despacho, balance de centros de trabajo y proporción de due dates fijados externamente. El desempeño del sistema, observado mediante simulación, se evalúa a través de una medida que pondera el atraso absoluto y el tiempo de flujo. Los due dates son fijados internamente a través de regresión lineal múltiple. Los resultados estadísticos muestran que los tres factores son significativos en el desempeño del sistema, y que en escenarios donde ambas medidas tienen igual ponderación, si los due dates son fijados internamente FIFO y SPT producen mejores resultados, mientras que en presencia de due dates fijados externamente, EDD combinado con FIFO (EDD combinado con TWKR) es la mejor alternativa para el caso balanceado (desbalanceado).

Palabras Claves: Determinación de due dates, taller de trabajo, multicapacidad, regresión lineal múltiple.

ABSTRACT

A multifactorial analysis of variance of the performance of a jobshop like production system with multicapacity (flexible jobshop) is realized, by considering the factors dispatching rule, workstation capacity balance and proportion of due dates setting done externally. The system performance, observed by simulation, is evaluated by a measure that weight the absolute lateness and the flow time. Due dates setting is done internally by multiple linear regression. The results shows that the three factors are significant with respect to the system performance, and in scenarios in which both measures are equally weighted, if the due dates setting is done internally FIFO and SPT produces better results, while in presence of externally due date setting, EDD combined with FIFO (EDD combined with TWKR) is the better alternative for the balanced (unbalanced) case.

Keywords: Due date setting, flexible jobshop, multicapacity, multiple linear regression.

¹ Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción, Chile.
e-mail: marcneir@udec.cl / esalazar@udec.cl

1. INTRODUCCION

Definidas las decisiones de largo plazo como tipo de proceso y tecnología de producción, tipos de máquinas, layout, medios de transferencia de material en proceso, etc., la eficiencia se logra con una buena gestión del proceso productivo, que se traduce, en términos prácticos, a la toma de decisiones orientada a reducir aquellos costos que se derivan del normal funcionamiento del sistema productivo. Estos costos están relacionados en parte con decisiones de muy corto plazo, circunscritas a la gestión de la programación de la producción y manejo de due dates, y corresponden a costos proporcionales al tiempo de proceso, como costos de energía y combustible de máquinas, horas extra, etc., y costos debidos a atrasos y prontitud con respecto a las fechas de entrega, como, por ejemplo, costos de imagen y costos de inventario en proceso.

Veral (2001) destaca la reducción de los tiempos de entrega e inventarios y la confiabilidad de las fechas prometidas, lo que, a nivel operativo, puede ser logrado mediante una mejor programación y mejor asignación de due dates. También señala que una empresa que es excelente en estas competencias, puede establecer estrategias competitivas como la confiabilidad en las entregas, al reducir la varianza de los tiempos de entrega, mejorando la productividad y la flexibilidad de la producción. Una de las medidas más importantes del nivel de satisfacción inmediata de los clientes respecto del desempeño del productor, es que el producto sea entregado en un plazo breve y respetando la fecha prometida.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Se considera un sistema donde la programación de los trabajos se realiza en base a fechas de entrega prometidas, fijadas internamente, total o parcialmente, mediante regresión múltiple, la que se determina para cada trabajo al momento de su arribo al sistema. El programa de producción debe estar orientado a optimizar una o más medidas de desempeño basadas directa o indirectamente en costos, como ser medidas orientadas a controlar la congestión del sistema o a controlar el cumplimiento de las fechas de entrega.

La asignación de due dates basada en regresión lineal múltiple consiste, básicamente, en, dada una regla de despacho, definir las variables regresoras que permitan modelar la espera de un trabajo que arriba al sistema en un modelo de regresión lineal múltiple. La estimación de la espera, sumada al tiempo de proceso, permite estimar un due date para el trabajo, lo que permite obtener un mejor desempeño comparado con técnicas clásicas de asignación de due dates (Neira, 2007).

El objetivo principal de la investigación es determinar con qué regla de despacho la regla de asignación de due dates, basada en regresión múltiple, logra un mejor desempeño global promedio del taller, considerando distintos escenarios.

En este estudio, el desempeño global del sistema integra criterios basados en el tiempo de flujo y due dates, ponderándolos según la política de programación:

- **Tiempo de flujo:** define el tiempo de permanencia de un trabajo en el sistema, lo que se relaciona con la velocidad de respuesta del sistema. Para este criterio se emplea el Tiempo de Flujo Relativo Medio (TFRM). El tiempo de flujo relativo de un trabajo es el cociente entre su tiempo de proceso y su tiempo de flujo.
- **Due dates:** la bondad de un método de asignación de due dates típicamente se ha medido por la tardanza media; sin embargo, la existencia de costos asociados a una termina-

ción temprana de las órdenes de trabajo, como costos de almacenaje, hace que sea más razonable medir este criterio en función de la precisión de los due dates, a través del Atraso Absoluto Medio (AAM).

Interesa evaluar el desempeño del sistema considerando estos dos criterios en forma simultánea, a través de una medida de desempeño global:

$$M_{\alpha} = \alpha \cdot M_1 + (1 - \alpha) \cdot M_2 \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

La medida de desempeño global (M_{α}) se define como la ponderación de dos medidas: M_1 y M_2 . M_1 es una función del AAM, y M_2 es una función del TFRM, que normalizan sus respectivos valores al rango $[0, 1]$, esto es, $M_1 = f(\text{AAM})$ y $M_2 = g(\text{TFRM})$. De este modo, M_1 y M_2 eliminan los efectos de orden de magnitud de sus respectivas variables. El parámetro α define la política de programación.

3. AMBIENTE PRODUCTIVO

El sistema prototipo utilizado en este trabajo corresponde al problema denominado *Problema_10* (ver Larrazábal, 2003 y Salazar y Larrazábal, 2006). Según Baker y Bertrand (1981) es muy importante elegir un sistema relativamente simple para poder establecer principios, donde es posible enfocarse en los procedimientos de asignación de due dates sin que se mezclen otros efectos que aparecen en sistemas demasiado complejos. Sus características son:

- Sistema tipo jobshop dinámico con múltiples centros de trabajo de multicapacidad.
- Utilización media del sistema en torno al 85 %.
- Regla de despacho FIFO.
- Capacidad balanceada.
- Sin fallas de máquinas.
- No se consideran tiempos de preparación dependientes de la secuencia.
- Se ignoran tiempos de transporte.

El *Problema_10* es un sistema tipo jobshop dinámico de 10 centros de trabajo con multicapacidad, con máquinas idénticas en cada centro de trabajo. Los trabajos arriban con tiempo entre arribos distribuidos exponencial con media 0.1 horas. Existen 5 tipos de trabajos, cada tipo con diferente ruta de proceso, que arriban con probabilidades diferentes. En las Tablas A1 y A2 del anexo se resume los datos por tipo de trabajo (probabilidad, número de operaciones, ruta de proceso) y tiempos de proceso por operación respectivamente. Los tiempos de proceso se modelan como variables aleatorias independientes con distribución triangular simétrica cuyos parámetros mínimo (a), moda (m) y máximo (b) dependen de la operación. El *Problema_10* también fue utilizado por Concha (2006) y Araya (2004) para el estudio de reglas de asignación de due dates.

Se utiliza la regla de despacho FIFO, la que establece atención por orden de llegada al centro de trabajo. Debe hacerse notar que los resultados que se obtengan con esta configuración no son absolutos, en el sentido de que el tipo de regla de despacho utilizada afecta el desempeño de una regla de asignación de due dates. Por ejemplo, la regla FIFO hace que los tiempo de flujo reales sean insensibles a la información de due dates o a la regla de due dates empleada, lo que favorece la repetitividad y consistencia del escenario para el análisis multivariante.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL DESEMPEÑO

4.1. Diseño Factorial

Se realiza un análisis multifactorial de la varianza del desempeño global del sistema prototipo, en el que los due dates son fijados mediante regresión múltiple, lo que implica realizar un análisis descriptivo tanto de la variable dependiente como de los factores que se incluyen en el modelo, y determinar cómo se relaciona con cada factor. La simulación computacional del sistema se realizó utilizando Promodel 4.2. Para los cálculos estadísticos se utilizó Statsgraphics 5.0. El desempeño del sistema se evalúa de acuerdo a la medida global definida en la sección 2:

$$M_{\alpha} = \alpha \cdot f(\text{AAM}) + (1 - \alpha) \cdot g(\text{TFRM}) \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

Para las funciones f y g se sugieren formas exponenciales, las que se obtienen y presentan en la sección 5, en el contexto de los resultados experimentales.

Se consideran los factores regla de despacho, balance en la utilización de los centros de trabajo y proporción de due dates fijados externamente:

- **Factor (RD):** regla de despacho utilizada para secuenciar los trabajos.
 - *EDD_FIFO*: selecciona el trabajo con menor due date (la ecuación de regresión que determina los due dates se obtiene priorizando los trabajos con la regla FIFO).
 - *EDD_SPT*: selecciona el trabajo con menor due date (la ecuación de regresión que determina los due dates se obtiene priorizando los trabajos con la regla SPT).
 - *EDD_TWKR*: selecciona el trabajo con menor due date (la ecuación de regresión que determina los due dates se obtiene priorizando los trabajos con la regla TWKR).
 - *FIFO*: selecciona los trabajos por orden de llegada al centro.
 - *SPT*: selecciona el trabajo con menor tiempo de proceso en el centro de trabajo.
 - *TWKR*: selecciona el trabajo con menor tiempo de proceso restante (suma de los tiempos de proceso de todas las operaciones no realizadas).
- **Factor Balance (B):** refleja homogeneidad en la utilización de los centros de trabajo.
 - *Balanceado*: la utilización media de los centros de trabajo en torno al 85%.
 - *Desbalanceado*: los centros tienen utilidades medias diferentes.
- **Factor Proporción de Due Dates Fijados Externamente (PDDFE):** proporción de trabajos cuyo due date se fija externamente (fuera del control del Departamento de Producción). Para este factor se consideran los niveles: 0%, 15%, 30% y 45%.

Si el factor PDDFE es igual a 0%, significa que el Departamento de Producción tiene total control en la determinación de los due dates, mientras que si el factor PDDFE es igual a 45%, prácticamente la mitad de los due dates son fijados externamente, por lo que en este caso, el Departamento de Producción tiene un bajo control sobre la fijación de los due dates. La combinación de estos 3 factores da lugar a 48 escenarios productivos diferentes.

La metodología para determinar la regla de asignación de due dates consiste en modelar la espera de un trabajo mediante una ecuación de regresión lineal múltiple. La metodología para obtener las ecuaciones de regresión consiste en simular el sistema balanceado, utilizando FIFO y con una PDDFE de 0%. Con un período de calentamiento equivalente al procesamiento de 2000 trabajos (obtenido gráficamente), procesando posteriormente los siguientes 1200 trabajos para la recolección de estadísticas (tamaño fue escogido por razones de representatividad y validez del modelo).

Al momento de arribo de cada trabajo al sistema, se definen los valores de las siguientes variables:

• **Variables de características del trabajo**

- **Tipo (Tipo)** identifica el trabajo.
- **Tiempo de Proceso (Tpo_Proceso)**: variable real positiva, que corresponde al tiempo de proceso total de un trabajo.
- **Número de operaciones (Nop)**: número de operaciones de una orden.

• **Variables del estado del sistema**: reflejan el grado de congestión del sistema, orientándose específicamente a la información de la ruta del trabajo.

• **Carga Media de la Ruta (ó CMR)**: variable real positiva, se obtiene sumando las cargas medias de todos los centros que forman la ruta del trabajo. La carga media de un centro es la suma del tiempo de proceso de los trabajos en cola, dividida por el número de máquinas paralelas del centro (Concha, 2006). Se define como:

$$\sum_{k \in R_i} \frac{C_k}{m_k}$$

donde C_k es la carga total en cola del centro k , m_k es el número de máquinas paralelas en el centro k y R_i es la ruta del trabajo tipo i .

• **Número de Trabajos en la Ruta (ó NTR)**: variable entera positiva es la cantidad de trabajos en cola en todos los centros por donde pasará el trabajo. Sin embargo, esta variable puede estar correlacionada con CargaMedia_Ruta (CMR), por lo que debe tenerse cuidado en su inclusión para evitar colinealidad. Se define como:

$$\sum_{k \in R_i} N_k$$

donde N_k es el número de trabajos en el centro k y R_i es la ruta del trabajo tipo i .

• **Espera Media Ruta (ó EMR)**: variable real positiva. En cada centro se mantiene un promedio móvil dinámico de las últimas esperas experimentadas. Esto permite saber cuál es un promedio de espera reciente, y que seguramente influirá en la espera que se quiere estimar, pues la espera como variable a estimar es dinámica en el sentido de que se construye en el tiempo. Se define como:

$$\sum_{k \in R_i} E_k^q$$

donde E_k^q es la espera promedio en la cola del centro k de las últimas q esperas (en este trabajo se utiliza $q=3$, para que no influyan esperas no recientes y E_k^q sea representativo de la tendencia del sistema «en el momento de arribo»), y R_i es la ruta del trabajo tipo i .

Estas 6 variables se utilizan como potenciales regresoras. Además, se incluyen las siguientes dos variables como potenciales regresoras para SPT y TWKR respectivamente:

- **VAR_SPT:** variable que estima la espera total para un trabajo en el sistema programado con SPT. En cada centro se mantienen registros actualizados del menor y el mayor tiempo de proceso entre los trabajos en cola. Se asume que cuando un trabajo arriba a un centro con carga C_k , esperará una proporción de esta carga. Se define como:

$$VAR_SPT_i = \sum_{k \in R_i} \frac{C_k \cdot \left[\frac{\text{Min}(0, p_{ik} - p_k^{\text{min}})}{p_k^{\text{max}} - p_k^{\text{min}}} \right]}{m_k}$$

donde C_k es la carga en la cola del centro k , m_k es el número de máquinas paralelas en el centro k , p_{ik} es el tiempo de proceso del trabajo tipo i en el centro k , p_k^{min} y p_k^{max} son el mínimo y máximo tiempo de proceso en el centro k de entre todos los trabajos en cola del centro k al momento de arribo del trabajo i , y R_i es la ruta del trabajo tipo i .

- **VAR_TWKR:** suma del tiempo de proceso restante que tiene el trabajo al pasar por cada centro de su ruta, es decir, es la suma de los índices de prioridad que le asignaría TWKR al pasar por cada centro de su ruta. Se define como:

$$VAR_TWKR_i = \sum_{j=1}^{n_i} \left[\sum_{h=i}^{N_i} p_{ih} \right]$$

donde n_i es el número de operaciones del trabajo i y p_{ih} es el tiempo de proceso del trabajo i en su operación h .

Por otro lado, para cada trabajo se registra al momento de su salida del sistema, el tiempo total que esperó, es decir, la suma de las esperas en los centros que visitó.

Se observa que al cambiar al estado desbalanceado, los valores de las observaciones de las variables independientes y dependiente cambian, lo que significa que para cada regla de despacho se debe obtener una ecuación de regresión en estado balanceado y otra en estado desbalanceado. Al cambiar el nivel de PDDFE no se observan cambios en las variables independientes ni en la dependiente; por lo tanto, en todos los niveles de PDDFE la ecuación de regresión es la misma.

Así, teniendo como variable dependiente a la Espera o una transformación de Box-Cox de la Espera, en caso de ser necesario para obtener homocedasticidad de los errores, se lleva a cabo la estimación de una ecuación de regresión con los métodos Backward y Forward eligiendo el que tenga mayor bondad de ajuste, medida por el coeficiente de determinación R^2 . Con la ecuación de regresión de la Espera o su transformación Box-Cox, la regla de asignación de due date queda:

$$d_i = r_i + p_i + w_i^{\wedge}$$

El due date del trabajo i es la suma de su fecha de liberación, su tiempo de proceso y la espera estimada con la ecuación de regresión (\hat{w}_i).

Luego, se cambia a estado desbalanceado, y se repite el proceso, obteniendo una ecuación de regresión para FIFO con el sistema desbalanceado.

Se repite todo el procedimiento para SPT y para TWKR, obteniéndose un total de 6 ecuaciones de regresión para la Espera. Para cada ecuación de regresión se realizan análisis de cumplimiento de supuestos de la regresión, tanto para las variables independientes (lo que puede producir transformaciones de Box-Cox para algunas variables independientes) como para el valor teórico o residuos del modelo (lo que puede introducir una transformación de Box-Cox para la variable dependiente Espera). La Tabla A5 del anexo muestra las fórmulas para calcular el due date para cada escenario del experimento de análisis de varianza.

La Tabla A3 del anexo muestra el número de máquinas paralelas y las tasas de utilización de cada uno de los 10 centros en estado *Balanceado* y *Desbalanceado* para el sistema programado con FIFO. Para obtener el nivel *Desbalanceado*, se modifica arbitrariamente el número de máquinas paralelas de los centros 1, 2, 3, 5, 6 y 9.

El cálculo de due dates se realiza según sean de origen externo o interno. Sea $PDDFE=p$ ($p=0.00, 0.15, 0.30$ ó 0.45 , según sea el nivel considerado); se definen las variables Bernoulli $B_1(p)$ y $B_2(0.5)$. Para B_1 , el evento "éxito", de probabilidad p , significa que el due date es externo, y el evento «fracaso», de probabilidad $1-p$, significa que el due date es interno. Cada vez que un trabajo arriba al sistema, se genera una observación aleatoria de la distribución $B_1(p)$. Si el trabajo tiene due date interno, este se calcula con la ecuación de regresión (due date de prioridad normal), y si el due date es externo, se genera una observación aleatoria de la distribución $B_2(0.5)$, en que el evento "éxito", de probabilidad 0.5 , significa que el due date externo es de alta prioridad, y el evento "fracaso", de probabilidad 0.5 , significa que el due date externo es de baja prioridad.

La Tabla N° 1 muestra la manera de calcular el due date en cada caso (en esta Tabla $T(a,m,b)$ es una variable aleatoria distribuida triangular con parámetros a , m y b). Los parámetros de estas distribuciones se han fijado en base a lo sugerido por Dumond y Mabert (1985), quienes también abordan el problema de incluir trabajos con due date externo. También, r es la fecha de liberación y p el tiempo de proceso del trabajo. Se supone que cuando los due dates son externos es el cliente quien lo fija, pudiendo tener alta o baja prioridad con la misma probabilidad. Cuando el cliente asigna una prioridad alta al trabajo, permite un tiempo de flujo que supera en promedio en un 10% al tiempo de proceso, en tanto que si asigna una prioridad baja al trabajo, permite un tiempo de flujo que en promedio supera en un 100% al tiempo de proceso.

Tabla N° 1: Cálculo de due dates según origen y prioridad

Due Date		Fórmula para el Due Date
Origen	Prioridad	
Externo	Baja	$d = r + T(1.80, 2.00, 2.20) \cdot p$
	Alta	$d = r + T(1.05, 1.10, 1.15) \cdot p$
Interno	Normal	Regresión Lineal Múltiple

4.2. Plan Experimental para el análisis de varianza del desempeño

En las simulaciones para obtener las ecuaciones de regresión se usó la misma secuencia de números aleatorios, mientras que en las simulaciones para obtener las estadísticas para los análisis de varianza se cambia la semilla del generador de números aleatorios, para validar las ecuaciones de regresión. Además, se usa la misma secuencia de números aleatorios para los 48 escenarios, que da lugar la combinación de los factores RD, B y PDDFE, a fin de crear la condición de validez interna del experimento puro, y para aislar cualquier factor no deseado. Esto conduce a realizar comparaciones pareadas entre escenarios.

En cada escenario se recolectan estadísticas de medidas de desempeño. Para determinar el tamaño del período de calentamiento y el número de trabajos sobre los cuales se recolectan las estadísticas, es necesario observar el comportamiento del *Atraso Absoluto* y *Tiempo de Flujo Relativo* de una secuencia de trabajos dentro de un horizonte de tiempo adecuado. Considerando una jornada de trabajo diaria de 8 horas, 365 días al año, se tienen 2920 horas. Se evalúa el comportamiento anual del sistema, suponiendo que año tras año se mantienen las condiciones.

Para cada uno de los 48 escenarios se realiza una simulación de 30 réplicas, a fin de que la media (sobre réplicas) del AAM y TFRM se distribuya aproximadamente normal. El AAM y el TFRM (con $30 \times 48 = 1440$ observaciones cada una) sirven de base para realizar el experimento de análisis de varianza.

El plan experimental de análisis de varianza realizado, donde los análisis ANOVA y las comparaciones pareadas se realizan con un nivel de confianza del 95%, se presenta a continuación:

- Especificar la medida de desempeño.
- Determinar si el factor RD es significativo mediante ANOVA y realizar un ranking de reglas de despacho en cuanto a su desempeño como promedio sobre todos los escenarios a través del test de comparación múltiple LSD (*Least Significant Difference*). En caso de existir heterocedasticidad se aplican comparaciones simples utilizando el test t pareado (para usar el test LSD las medias deben provenir de muestras con varianza semejante).
- Determinar si el factor B es significativo mediante ANOVA y determinar si la diferencia entre sus niveles es significativa mediante comparación múltiple LSD. En caso de existir heterocedasticidad se aplican comparaciones simples utilizando el test t pareado.
- Determinar si el factor PDDFE es significativo mediante ANOVA y determinar si la diferencia entre sus niveles es significativa a través de comparación múltiple LSD. En caso de haber heterocedasticidad se aplican comparaciones simples utilizando el test t pareado.
- Determinar si existen interacciones significativas entre factores hasta orden 2.
- Realizar un ranking de reglas de despacho en cada uno de los 8 escenarios a que da lugar la combinación de los factores B y PDDFE.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

Una de las herramientas más útiles para analizar los resultados es la *Gráfica de Medias por Factores*, que corresponde a la matriz de gráficas de 3 por 3 mostrada en la Figura N° 1.

5.1. Desempeño Global

En esta sección se explica la estructura de las funciones f y g cuya función es normalizar los valores del AAM y TFRM en el intervalo $[0,1]$. El desempeño global se define en la sección 2 como:

$$M_{\alpha} = \alpha \cdot f(\text{AAM}) + (1 - \alpha) \cdot g(\text{TFRM}) \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

Por definición, TFRM está normalizada a $[0,1]$; sin embargo, la función g se escoge de manera que permita preservar los percentiles de su distribución, lo cual es importante para valorar el tiempo de flujo relativo medio de manera relativa a la distribución de la cual proviene. Lo mismo es aplicable a la función f .

La medida global M_{α} debe ser un indicador, que aplicado a un grupo de trabajos procesados, dentro de un período de tiempo bajo, una misma regla de despacho y regla de asignación de due dates, muestre cuán bien se desempeñan estas dos reglas en conjunto respecto de *más de una medida de desempeño*.) Los criterios que se integran en la medida de desempeño global, AAM y TFRM; son criterios independientes, en el sentido de que mejorar uno no necesariamente asegura que se mejore el otro. AAM y TFRM tienen rangos de variación diferentes, por lo que debe anularse el efecto que esta diferencia pueda tener sobre M_{α} normalizando los valores de estas dos medidas, es decir, haciendo que sus homólogos, M_1 y M_2 varíen en el intervalo $[0,1]$.

Mientras mayor sea M_{α} , significa que mejor es el desempeño; por lo tanto, lógicamente, si el atraso absoluto medio es "muy pequeño" M_1 debe valer uno, y si es "muy grande" debe valer cero; del mismo modo, si el tiempo de flujo relativo medio es "muy pequeño", M_2 debe valer cero, y si es "muy grande" (el máximo de la distribución), debe valer uno. En ambos casos, se desea también que si se obtiene un valor igual a la mediana, el respectivo indicador tome el valor 0.5. Todo esto se puede conseguir si se hace que f se aproxime a uno menos la función de distribución acumulada del AAM, y g aproxime a la distribución acumulada del TFRM.

La Tabla A4 del anexo resume el análisis descriptivo del AAM y el TFRM, mostrando la descripción estadística de estas 2 medidas. Puede verse que sus magnitudes son diferentes y que son unimodales, donde el AAM tiene mayor apuntamiento y una asimetría positiva notoria; además, después del cuartil superior tiene una cola que comienza en el percentil 95 (2.23) y termina en el máximo (3.52). Por otro lado, el TFRM tiene poca curtosis, está más distribuido y los rangos externos a los cuartiles son menores (no hay colas pronunciadas).

Por lo tanto, se desea que f y g anulen los efectos de magnitud del AAM y el TFRM, y que concentren su variabilidad en los rangos intercuartiles, siendo máximas las derivadas de f y g en las medianas del AAM y el TFRM respectivamente, de modo que ambas funciones tengan poder de discriminación entre las reglas de despacho. Esto significa que para f , la imagen del mínimo del AAM debe ser 1; del primer cuartil, 0.75; de la mediana, 0.5; del tercer cuartil, 0.25, y del máximo, 0. Para g la imagen del mínimo del TFRM debe ser 0; del primer cuartil, 0.25; de la mediana, 0.5; del tercer cuartil, 0.75, y del máximo, 1.

Para las funciones f y g se sugieren formas exponenciales. Esta forma asigna las imágenes requeridas al mínimo, primer cuartil, mediana, tercer cuartil y máximo. Concentra la variación de f y g al hacer que el 50% de la variabilidad se concentre en el rango intercuartil. Se considera la siguiente forma general para f y g :

$$e^{-\phi(x+\omega)^\psi} + \frac{e^{(\mu(\delta \cdot x + \rho) - \tau(\delta \cdot x + \rho)^\theta)}}{\eta}$$

donde $\phi, \omega, \psi, \mu, \delta, \rho, \tau, \theta,$ y η son parámetros de forma. Estos parámetros se obtuvieron mediante ensayo y error con el software gráfico winplot², ajustando f a «uno menos la distribución relativa acumulada del AAM», y g a la «distribución relativa acumulada de TFRM». Estos ajustes sólo se hicieron a nivel de cuartil, es decir, se restringieron las funciones f y g a pasar por los puntos asociados al mínimo, primer cuartil, mediana, tercer cuartil, y máximo de las respectivas distribuciones. Podría incrementarse la precisión del ajuste tomando los deciles como restricción del ajuste, pero se requeriría de funciones mucho más complejas, y no es probable que la capacidad de discriminación de las funciones aumente significativamente. Por lo tanto, se considera que el uso de cuartiles es adecuado resultando M_1 y M_2 :

$$f(AAM) = e^{-0.31(AAM+0.25)^{3.7}} + \frac{e^{((1.5 \cdot AAM + 1.5) - 0.036 \cdot (1.5 \cdot AAM + 1.5)^{2.8})}}{120}$$

$$g(TFRM) = 1 - e^{-16(TFRM+0.11)^{48}} + \frac{e^{(-1400(TFRM-0.81)^2)}}{3.8}$$

Así, M_α integra dos criterios en una sola medida al normalizar el AAM y el TFRM mediante las funciones f y g respectivamente, cuyo propósito es aislar los efectos de magnitud valorando a estas medidas como lo hace la función de distribución acumulada.

5.2. Política de igual énfasis en Atraso y Espera ($\alpha=0.5$)

5.2.1. Análisis Multifactorial de Varianza ($\alpha=0.5$)

Al considerar $\alpha=0.5$ se está dando igual importancia al AAM y al TFRM. La Figura N° 1 muestra las medias de los niveles para $M_{0.5}$. En la diagonal están las medias sobre todos los factores y, fuera de la diagonal, las medias entre dos factores. La Tabla N° 2 muestra, para cada factor, las medias de los niveles y los grupos homogéneos por la comparación múltiple LSD. La última columna señala la significación estadística de los tres factores y de las interacciones (sólo si son significativas) de orden máximo 2.

Tanto el AAM como el TFRM son variables asociadas a un grupo de trabajo, y sus efectos de tamaño se anulan mediante funciones de normalización (ver sección 5.1), por lo que M_1 y M_2 reflejan posiciones relativas dentro de las respectivas distribuciones de ambas variables. De modo tal que la medida global, en este caso, está sumando las ponderaciones de M_1 y M_2 , es decir, de los percentiles de ambas distribuciones en la escala [0,1].

La Figura N° 1 indica que la mejor regla es EDD_FIFO, y la que menor desempeño obtiene es TWKR; el resto de las reglas tiene desempeño similar. En general, el desbalance mejora el desempeño (cuadro 2.2), sobre todo para TWKR (cuadro 1.2). El desempeño se deteriora al perder el control de la fijación de los due dates (cuadro 3.3).

² winplot.exe es una aplicación gráfica de libre acceso (math.exeter.edu/rparris/winplot.html).

Notar cómo afecta la pérdida de control en la fijación de due dates, al desempeño de la regla FIFO (cuadro 1.3), que pasa de ocupar el primer lugar cuando el PDDFE es igual a 0%, a ocupar el último lugar junto a TWKR, cuando el PDDFE es igual a 45%. Puesto que el TFRM representa la mitad de $M_{0.5}$, era esperable que SPT tuviese un mejor desempeño en relación al resto de las reglas; sin embargo, cuando el PDDFE es mayor que 15%, SPT es claramente inferior a las reglas orientadas a due dates.

Los tres factores son significativos en el desempeño (ver Tabla N° 2). De las reglas con desempeño intermedio, solo SPT y su versión orientada a due date, EDD_SPT, tienen igual desempeño estadísticamente. Además, todas las diferencias entre los niveles de los factores Balance y PDDFE son estadísticamente significativas.

Figura N° 1: Gráfico de Medias de Factores para M_{α} ($\alpha=0.5$)

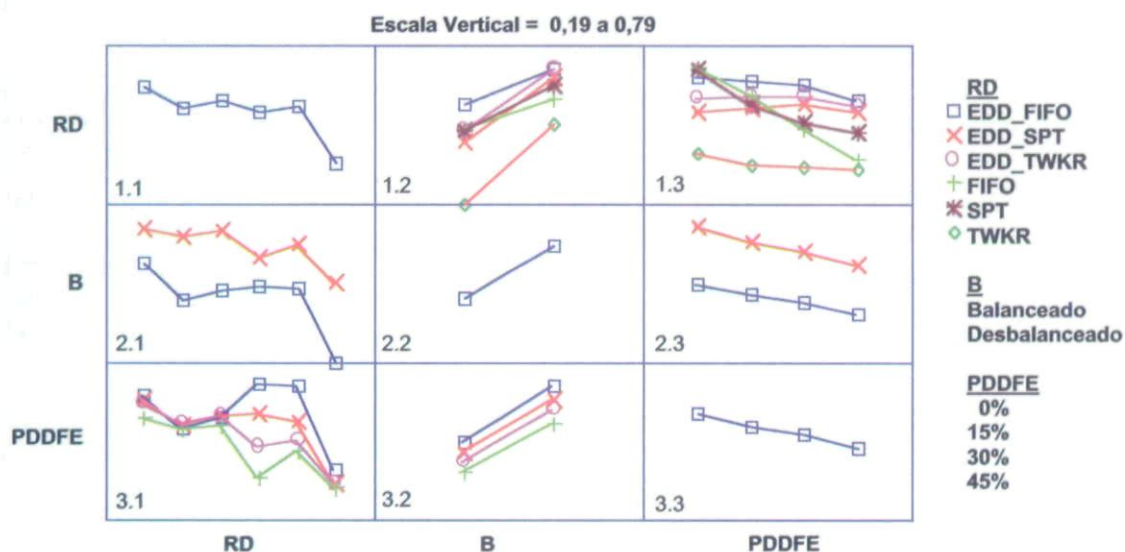


Tabla N° 2: Análisis de factores para M_{α} ($\alpha=0.5$)

Factor	Niveles	Media	Grupos Homogéneos				Significación (p)
RD	EDD_FIFO	0.634	x				RD (0,00) RD/Bal (0,00) RD/PDDFE (0,00)
	EDD_TWKR	0.581		x			
	SPT	0.556			x		
	EDD_SPT	0.548			x		
	FIFO	0.535				x	
	TWKR	0.341					
B	Desbalanceado	0.632	x				Bal (0,00) PDDFE/Bal (0,01)
	Balanceado	0.433			x		
PDDFE	0%	0.597	x				PDDFE(0,00)
	15%	0.550		x			
	30%	0.515			x		
	45%	0.468				x	

5.2.2. Análisis de robustez de reglas de despacho para $\alpha=0.5$

La Tabla Nº 3 muestra los grupos homogéneos entre los niveles de B y PDDFE para cada regla de despacho. Mientras más homogeneidad exista más robusta es la regla.

Tabla Nº 3: Comparaciones LSD de niveles de Balance y PDDFE por RD para M_{α} ($\alpha=0.5$)

Factor	Nivel	Grupos Homogéneos (LSD)																																																																														
		EDD_FIF O		EDD_SPT		EDD_TW KR		FIFO		SPT		TWKR																																																																				
B	Balanceado	x		x		x		x		x		x			Desbalanceado		x		x		x		x		x		x	PDDFE	0%	x		x		x		x		x		x		15%	x	x	x		x		x	x	x		x	x	30%		x	x		x		x	x		x		x	45%			x	x		x		x	x		x	x
	Desbalanceado		x		x		x		x		x		x	PDDFE	0%	x		x		x		x		x		x			15%	x	x	x		x		x	x	x		x	x	30%		x	x		x		x	x		x		x	45%			x	x		x		x	x		x	x													
PDDFE	0%	x		x		x		x		x		x			15%	x	x	x		x		x	x	x		x	x		30%		x	x		x		x	x		x		x	45%			x	x		x		x	x		x	x																										
	15%	x	x	x		x		x	x	x		x	x		30%		x	x		x		x	x		x		x		45%			x	x		x		x	x		x	x																																							
	30%		x	x		x		x	x		x		x		45%			x	x		x		x	x		x	x																																																					
	45%			x	x		x		x	x		x	x																																																																			

Como puede observarse en la Tabla Nº 3, ninguna regla de despacho es robusta al factor B. Sin embargo, las reglas EDD_SPT y EDD_TWKR son robustas frente al factor PDDFE, pues al aumentar la proporción de due dates externos no se deteriora el desempeño de ellas de forma estadísticamente significativa. EDD_FIFO y TWKR muestran una robustez media a este factor, pero SPT y FIFO ven deteriorado su desempeño de manera significativa con mucha facilidad frente a aumentos de este factor.

5.2.3. Análisis de escenarios

La Tabla Nº 4 muestra el ranking de reglas de despacho obtenido con comparaciones múltiples LSD en cada escenario para $M_{0.5}$. Se muestra entre paréntesis el AAM de cada regla para cada escenario. Esto permite identificar cuál regla es la más adecuada en cada escenario productivo.

Si el taller está balanceado y hay control total en la fijación de due dates, FIFO es la mejor regla; si la proporción de due dates externos aumenta, EDD_FIFO es la mejor regla. Pero si el taller está desbalanceado, SPT o FIFO obtiene el mismo desempeño y es el más alto cuando hay control total en la fijación de due dates, en tanto que si se pierde control en la fijación de due dates, cualquier regla basada en EDD obtiene el mismo desempeño y es el mejor en relación al resto de las reglas. En ambos casos TWKR tiene el menor desempeño, y el factor PDDFE produce un deterioro notorio del desempeño sobre FIFO.

5.3. Principales resultados obtenidos

EDD_FIFO es la mejor regla, seguida de EDD_TWKR (ver Figura Nº 1). Si hay control total en la fijación de due dates FIFO es la mejor regla, pero al aumentar PDDFE, EDD_FIFO es la mejor regla en el caso balanceado, y todas las reglas EDD, para el caso desbalanceado. El factor PDDFE afecta a FIFO de forma más fuerte que a SPT y TWKR, es decir, los efectos marginales son constantes para FIFO y decrecientes para SPT y TWKR (ver Figura Nº 1).

Tabla N° 4: Ranking LSD de reglas de despacho por escenarios ($\alpha = 0.5$)

		Factor PDDFE			
		0%	15%	30%	45%
Factor Balance	Balanceado	FIFO (0.65)	EDD_FIFO (0.58) FIFO (0.54)	EDD_FIFO (0.57)	EDD_FIFO (0.52)
		SPT (0.60) EDD_FIFO (0.59)	SPT (0.47) EDD_TWKR (0.47)	EDD_TWKR (0.47) EDD_SPT (0.44)	EDD_TWKR (0.45) EDD_SPT (0.42)
		EDD_TWKR (0.46)	EDD_SPT (0.42)	EDD_SPT (0.44) FIFO (0.41) SPT (0.41)	SPT (0.38)
		EDD_SPT (0.40)	TWKR (0.18)	TWKR (0.18)	FIFO (0.30)
		TWKR (0.21)			TWKR (0.17)
	Desbalanceado	SPT (0.79) FIFO (0.76)	EDD_FIFO (0.72) EDD_TWKR (0.70)	EDD_TWKR (0.70) EDD_FIFO (0.70) EDD_SPT (0.68)	EDD_TWKR (0.66) EDD_SPT (0.64) EDD_FIFO (0.64)
		FIFO EDD_FIFO (0.74)	EDD_TWKR EDD_SPT (0.68)	SPT (0.57)	SPT (0.53)
		EDD_FIFO EDD_TWKR (0.70)	EDD_SPT SPT (0.65) FIFO (0.65)	FIFO (0.53)	TWKR (0.45)
		EDD_SPT (0.67)	TWKR (0.48)	TWKR (0.47)	FIFO (0.40)
		TWKR (0.54)			

6. CONCLUSIONES

En esta investigación se estudia la variabilidad de una medida de desempeño global que integra el Atraso Absoluto Medio (AAM) y el Tiempo de Flujo Relativo Medio (TFRM). Se realiza un experimento de análisis de varianza controlando tres factores: Regla de Despacho (RD), Balance de Centros de Trabajo (B) y Proporción de Due Dates Fijados Externamente (PDDFE).

M_α , con $\alpha=0.5$ es una medida exigente, pues combina en igual medida dos criterios en que la optimización de uno no significa la optimización del otro, lo que hace difícil e impreciso decir de antemano cómo es el ranking para $\alpha=0.5$. Bajo esta política el predominio es de las reglas orientadas a due dates. EDD_FIFO es la mejor regla seguida de EDD_TWKR. EDD_SPT y SPT, que no tienen diferencia estadísticamente significativa, ocupan el tercer lugar, FIFO ocupa el cuarto lugar y TWKR ocupa el último lugar muy lejos de todo el grupo (ver Figura N° 1 y Tabla N° 2).

El factor B es significativo; todas las reglas experimentan una mejora del desempeño para el nivel *Desbalanceado*, pero TWKR es más sensible que el resto. El factor PDDFE es significativo y el desempeño en general disminuye cuando aumenta el PDDFE, pues los due dates externos no consideran el estado del taller. Un análisis de robustez (ver Tabla N° 4) indica que las reglas orientadas a due dates son robustas, y que TWKR mantiene un mal desempeño.

El análisis de escenarios revela quizá el resultado más importante de este trabajo. Al observar el cuadro 1.3 de la Figura N° 1 se ve que hay un solapamiento importante de reglas al aumentar el PDDFE, lo que indica que cuál sea la mejor regla depende del nivel del factor PDDFE (ver Tabla N° 4). Si hay control absoluto en la fijación de los due dates, la mejor regla es FIFO para el caso *Balanceado* y SPT y FIFO para el caso *Desbalanceado*; en segundo lugar se sitúan las reglas orientadas a due dates. Pero, al aumentar el factor PDDFE, en el caso *Balanceado* FIFO es superado por EDD_FIFO, y en el caso *Desbalanceado* todas las reglas basadas en EDD se imponen a SPT y FIFO. Si el PDDFE es de 45%, adicionalmente FIFO pasa a ocupar

el último lugar con TWKR. Las reglas orientadas a due dates son robustas frente a PDDFE porque EDD es una regla que, a diferencia de las reglas no orientadas a due dates, se "adapta" a los due dates, independiente de si estos son fijados interna o externamente. Las reglas no orientadas a due dates, al aumentar PDDFE tienen un deterioro del desempeño importante, y FIFO, en particular, tiene la caída más fuerte, casi lineal.

Los resultados obtenidos tienen implicaciones para la gestión de operaciones. Un Departamento de Producción que desea mejorar su desempeño, debe, en primer lugar, definir qué importancia relativa da al desempeño de due dates y qué importancia da al tiempo de flujo. Definido esto, se debe determinar a qué escenario productivo corresponde el taller en cuestión, y así saber qué regla es la más adecuada para optimizar los criterios definidos en la configuración específica. Identificada la regla, el Departamento de Producción debe recurrir a sus bases de datos históricos y, en ausencia de estos datos, a un estudio de simulación de su taller para obtener una ecuación de regresión múltiple que permita estimar las fechas de finalización. Luego, es necesario agregar la regla de secuenciamiento, obteniendo la combinación adecuada de reglas.

7. REFERENCIAS

- Araya, M. (2004). El problema de asignación de due dates. Informe de Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Concepción.
- Baker, K.R. (1974). Introduction to sequencing and scheduling. John Wiley and Sons, Inc.
- Baker, K.R., and Bertrand, J.W.M. (1981). An investigation of due date assignment rules with constrained tightness. *Journal of Operations Management*, vol. 1, 109-121.
- Concha, C. (2006): Asignación de due dates basada en el Estado del Sistema. Informe de Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Concepción.
- Dumond, J. and Mabert, V. (1985). Evaluating project scheduling and due date assignment procedure: an experimental analysis. *Management Science*, 101-118.
- Larrazábal, M.C. (2003). Configuración de sistemas de producción; Optimización basada en Simulación. Informe de Memoria de Título para optar el título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Concepción, 2003.
- Neira, M. (2007). Asignación de due dates basada en regresión lineal múltiple mediante simulación computacional. Informe de Memoria de Título para optar el título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Concepción, 2007.
- Salazar, E. y Larrazábal, M.C. (2006). Configuración de Sistemas de Producción utilizando Algoritmos Genéticos. Actas (CD) XIII Claio - Congreso Latino Iberoamericano de Investigación Operativa. Montevideo, Uruguay, 27.11 - 30.11.2006.
- Tsubone, H., Matsuura, H. and Kanda, M. (1992). Interactive Due Date Management System. *OMEGA International Journal of Management Science*, vol. 20, nº 1, pp 91-98.
- Veral, E.A. (2001). Computer Simulation of due date setting in multi-machine job shops. *Computers and industrial Engineering*, vol. 41, 77-94.

ANEXOS

Tabla A1: Descripción de Trabajos por Tipo Problema_10

Tipo de Trabajo	Rutas en centros de trabajo	Número de Operaciones	Probabilidad Arribo
1	3, 1, 2, 5	4	0.20
2	4, 8, 6, 1, 2	5	0.15
3	5, 3, 6, 4, 2, 8, 1, 7	8	0.15
4	9, 8, 1, 6, 5, 7, 4, 2, 3, 10	10	0.40
5	7, 2, 1, 9, 10, 6, 5	7	0.10

Tabla A2: Distribución de Tiempos de Proceso por Tipo y Operación para el Problema_10

Tipo Orden	Parámetro	Valor Parámetros Distribución Triangular
1	a	0.500, 0.600, 0.850, 0.500
	b	0.750, 0.850, 1.025, 0.650
	c	1.000, 1.100, 1.200, 0.800
2	a	0.800, 0.800, 0.750, 0.700, 0.600
	b	1.000, 1.050, 0.875, 0.800, 0.800
	c	1.200, 1.300, 1.000, 0.900, 1.000
3	a	0.400, 0.250, 0.700, 0.300, 0.350, 0.400, 0.500, 0.450
	b	0.800, 0.575, 0.850, 0.800, 0.725, 0.625, 0.850, 0.725
	c	1.200, 0.900, 1.000, 1.300, 1.100, 0.850, 1.200, 1.000
4	a	0.600, 0.400, 0.650, 0.800, 0.500, 0.650, 0.600, 0.550, 0.400, 0.450
	b	0.650, 0.500, 0.725, 0.850, 0.625, 0.725, 0.650, 0.650, 0.450, 0.525
	c	0.700, 0.600, 0.800, 0.900, 0.750, 0.800, 0.700, 0.750, 0.500, 0.600
5	a	0.300, 0.250, 0.300, 0.350, 0.400, 0.500, 0.200
	b	0.600, 0.525, 0.650, 0.625, 0.550, 0.750, 0.525
	c	0.900, 0.800, 1.000, 0.900, 0.700, 1.000, 0.850

Tabla A3: Número de máquinas por centro para niveles Balanceado y Desbalanceado

N° Centro	Balanceado		Desbalanceado	
	N° Máquinas	% Utilización	N° Máquinas	% Utilización
1	9	86.0	13	59.4
2	9	83.1	12	62.2
3	5	83.4	6	69.3
4	6	88.4	6	88.4
5	7	79.1	6	92.0
6	8	84.3	11	61.3
7	5	91.8	5	91.7
8	5	90.4	5	90.3
9	4	80.7	6	53.7
10	3	88.5	3	88.3

Tabla A4: Estadísticas Descriptivas para AAM y TFRM

Estadísticos de AAM	Estadísticos de TFRM
Población = 2400	Población = 2400
Promedio = 1.17	Promedio = 0.817
Mediana = 1.02	Mediana = 0.817
Varianza = 0.25	Varianza = 0.0006
Desv. Est. = 0.50	Desv. Est. = 0.02
Mínimo = 0.454	Mínimo = 0.74
Máximo = 3.526	Máximo = 0.88
Rango = 3.07	Rango = 0.14
Cuartil Inferior = 0.85	Cuartil Inferior = 0.79
Cuartil Superior = 1.39	Cuartil Superior = 0.83
Rango Intercuartil = 0.54	Rango Intercuartil = 0.037
Asimetría Est. = 28.19	Asimetría Est. = -0.66
Curtosis Est. = 19.46	Curtosis Est. = -5.55

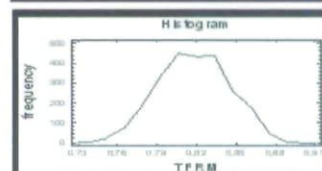
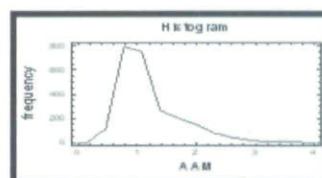


Tabla A5: Fórmulas para cálculo de due dates para cada escenario

RD	Balance	PDDFE	Fórmula para Due date (DD)	Bondad de Ajuste
FIFO y EDD_FIFO	Balanceado	Todos	⁽¹⁾ $DD = r + p + (0.08 + 0.026 * NOP + 0.819 * \sqrt{CMR})^2$	69%
	Desbalanceado	Todos	⁽²⁾ $DD = r + p + (-0.0057 + 0.043 * NOP + 0.257 * \sqrt{NTR})^2$	63.05%
SPT y EDD_SPT	Balanceado	Todos	⁽³⁾ $DD = r + p + (0.7 + 0.027 * T_Proc + 0.039 * \sqrt{NTR} + 0.158 * \sqrt[4]{EMR} + 0.089 * \frac{\sqrt[4]{VAR_SPT - 1}}{0.25})^4$	28%
	Desbalanceado	Todos	⁽⁴⁾ $DD = r + p + (0.619 + 0.049 * T_Proc + 0.069 * \sqrt{NTR} + 0.094 * \frac{\sqrt[4]{VAR_SPT - 1}}{0.25})^4$	33.08%
TWKR y EDD_TWKR	Balanceado	Todos	⁽⁵⁾ $DD = r + p + (0.283 - 0.174 * T_Proc + 0.266 * \sqrt{CMR} - 0.110 * NOP + 0.038 * \frac{\sqrt[4]{VAR_SPT - 1}}{0.25} + 0.481 * \frac{\sqrt[4]{VAR_TWKR - 1}}{0.25})^4$	37.35%
	Desbalanceado	Todos	⁽⁶⁾ $DD = r + p + (0.140 - 0.295 * Tproc - 0.162 * NOP + 0.110 * \sqrt{NTR} + 0.035 * \frac{\sqrt[4]{VAR_SPT - 1}}{0.25} + 0.714 * \frac{\sqrt[4]{VAR_TWKR - 1}}{0.25})^4$	36.01%

Copyright of Revista Ingeniería Industrial is the property of Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad del Bío-Bío and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.