



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados

e Investigación

Escuela de Ingeniería

Doctorado en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro

**MAXIMIZACIÓN DE LA UTILIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO
CONSIDERANDO VARIACIÓN EN CAPACIDAD, CALIDAD, TIEMPO
DE ENTREGA Y TASA DE INTERÉS.**

Tesis que para obtener el Grado de Doctor
en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro

Presenta

DANIEL ARTURO OLIVARES VERA

Director

ELÍAS OLIVARES BENÍTEZ

Puebla, México.

ABRIL, 2016



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados

e Investigación

Escuela de Ingeniería

Doctorado en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro

Se aprueba la Tesis:

MAXIMIZACIÓN DE LA UTILIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO
CONSIDERANDO VARIACIÓN EN CAPACIDAD, CALIDAD, TIEMPO DE
ENTREGA Y TASA DE INTERÉS.

Comité de Revisión.

Dr. ELÍAS OLIVARES BENÍTEZ

Director

Dr. ELEAZAR PUENTE RIVERA

Director

Dr. JOSÉ LUIS MARTÍNEZ FLORES

Asesor

Dra. DIANA SANCHEZ PARTIDA

Asesor

Puebla, México.

ABRIL, 2016

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por todo lo que me ha dado en la vida, así como esta oportunidad de realizar este proyecto de vida en compañía y conociendo personas maravillosas.

Agradezco a la gran mujer que me ha permitido ser su compañía y que sin su ayuda no hubiera sido posible el desarrollo de este proyecto de vida, gracias por tu amor, paciencia y compañía, gracias por el apoyo con los niños para lograr este proyecto Adriana Barajas, te amo. Gracias a mis hijos Yuny y Dany los cuales nos motivan a buscar ser mejores personas cada día, deseo esto los inspire hijos.

Gracias a mis padres Bernarda y Daniel, a mi madre por su cariño y por creer en mí siempre y a mi padre por enseñarme un camino y forma de vida, el cual necesita de esfuerzo para lograr lo que uno sueña. Gracias a mi hermana Pilar Olivares por el aliento brindado para seguir.

Al Dr. Elías Olivares por ser un ejemplo y guía, agradezco su paciencia y apoyo, este logró es suyo Dr. Elías, siempre recuerdo con cariño todas sus analogías, deseo seguir sus pasos.

Al Dr. Eleazar Puente, por ser una persona admirable y excelente amigo, gracias por todo su tiempo y conocimiento Dr. Eleazar. A Karla Gámez (próxima Dra.) por su amistad y ayuda en el desarrollo del proyecto, mucha suerte.

Al Dr. José Luis Martínez, en primera instancia por darme la oportunidad de aceptarme y después por sus comentarios y aportaciones en este trabajo.

A la Dra. Diana Sánchez, por su colaboración y disponibilidad en el desarrollo del proyecto.

Índice General

Agradecimientos	3
Introducción.....	7
Artículo 1.....	9
Minimization of costs in a supply chain considering the impact of quality	9
Artículo 2.....	28
Maximización de la Utilidad en la Cadena de Suministro Considerando variación en Capacidad, Calidad, Tiempo de Entrega y Tasa de Interés	28
Conclusiones.....	66
Referencias	68
Anexo 1	72
Anexo 2	73

Índice de Figuras

Artículo 1

Fig. 1 Supply Chain	10
Fig. 2 Percentage of non-conforming product	13
Fig. 3 Rework and Repair processes	13
Fig. 4 Graphic box and whisker for Capacity Costs	22
Fig. 5 Total cost	22
Fig. 6 Standardized Pareto Chart	22
Fig. 7 Main effects plot for cost	22
Fig. 8 Graphic box and whisker	24
Fig. 9 Graphic box and whisker for each expense	25
Fig. 10 Operating costs	25

Artículo 2

Fig. 1 Cadena de Suministro	31
Fig. 2 Porcentaje de Producto No Conforme de Reprocesos y Retrabajos	36
Fig. 3 Costo del tiempo de entrega en la ventana de tiempo de entrega	36
Fig. 4 Pareto Estandarizado para la utilidad de los factores	54
Fig. 5 Gráfica de efectos principales para Utilidad	54
Fig. 6 Gráficos de Cajas y Bigotes de la utilidad	55
Fig. 7 Gráficos de Medias	55
Fig. 8 Gráficos de Cajas y Bigotes de los Costos	57
Fig. 9 Utilidad, Costos Totales y Sub Costos	59
Fig. 10 Utilidad Total	60
Fig. 11 Costos Totales	60
Fig. 12 Costo de Calidad	60
Fig. 13 Costos de Materia Prima	60
Fig. 14 Costos de Producción	60

Fig. 15 Costos de Transporte	60
Fig. 16 Costos de Operación	61
Fig. 17 Costos de TIIE	61

Índice de Tablas

Artículo 1

Table 1. Instance parameters	20
Table 2. The defect rate rate in each echelon of the supply	21
Table 3. ANOVA Cost by Capacity	21
Table 4. Average Total Cost and Average of the Cost Components	23
Table 5. Results of Analysis of Variance for Cost (all effects included)	23
Table 6. Results of Analysis of Variance for Cost (only significant effects)	23
Table 7. Percentage of cost components with respect to total cost	25

Artículo 2

Tabla 1. Resumen de Costos Variando Capacidades y Calidades	53
Tabla 2. Análisis de Varianza para Utilidad de cada escenario.....	53
Tabla 3. Análisis de Varianza para Utilidad (Modelo Ajustado)	54
Tabla 4. ANOVA para Utilidad por Escenario	55
Tabla 5. Pruebas de Múltiple Rangos para Utilidad por Escenario	56
Tabla 6. ANOVA Costo por Concepto	57
Tabla 7. Pruebas de Múltiple Rangos para los Costos.....	58
Tabla 8. Porcentaje que representan los Costos.....	59

Introducción

Las decisiones de diseño en la cadena de suministro en muchos de los casos han sido abordadas en base al precio, en las cuales se ha buscado que la decisión de asignación sea a aquellos elementos que ofrezcan el menor precio hasta agotar su disponibilidad. Pocas investigaciones han integrado otros costos para las decisiones de asignación tales como el efecto que tiene la calidad en la utilidad.

La calidad en la cadena de suministro ha sido estudiada desde distintos puntos de vista, entre los cuales se pueden mencionar a aquellos que han revisado el impacto que tienen los costos de calidad (COQ) en las decisiones de asignación en la cadena de suministro. Esto ha servido como una manera de evaluar el desempeño de la misma y que a su vez garantice la minimización de los costos. Otras investigaciones que integran la calidad, también han incluido al índice de capacidad de proceso estimado (C_p) y al índice de capacidad de proceso real (C_{pk}) como elementos para medir el porcentaje de productos no conformes que son generados por los procesos.

Por otro lado, algunas otras investigaciones buscan abordar aspectos relacionados con la afectación a los costos por medio del tiempo de entrega de abastecimiento, en donde contemplan fechas límites para la recepción de pedidos.

En la investigación realizada se ha encontrado que es posible abordar un problema de diseño de cadena de suministro que evalúe el impacto de distintos factores, tales como los cambios en: calidad, tiempo de entrega y tasa de interés. Para ello propone un modelo de asignación que maximice la utilidad en la cadena de suministro compuesta por cuatro eslabones conformados por r proveedores que abastecen m materiales a f fabricantes que suministran p productos a d centros de distribución que los envían a c clientes.

Se asume que el aspecto de calidad será medido por medio del desempeño del C_p y C_{pk} como elementos determinantes para el cálculo del porcentaje de producto no conforme, y el costo que generan los reprocesos y retrabajos del mismo en la cadena de suministro. Para

el aspecto de tiempo de entrega se considera el concepto de ventana de tiempo, el cual opera con límites de especificación inferior y superior para proceder a calcular el porcentaje de producto que no cumple con el tiempo de entrega determinado y su costo respectivo acorde a los días de retraso o adelanto en la entrega. Finalmente se integra el cálculo del costo de financiamiento en la cadena de suministro derivado del costo por exceder el precio objetivo con respecto al precio real del producto adquirido.

El objetivo del modelo para resolver el problema de diseño de cadena de suministro, es asegurar tomar la decisión que de cómo resultado la mayor utilidad tomando en cuenta los costos incurridos.

Para lograr lo anterior, un primer análisis considera minimizar los costos en el diseño de la cadena de suministro evaluando el impacto bajo distintos escenarios de capacidad, y después se hace un segundo análisis tomando en cuenta cambios en la capacidad y la calidad. Para esto se elabora un diseño de experimentos factorial 3^2 . Los resultados son analizados por medio del análisis de varianza (ANOVA) y así determinar la significancia correspondiente de cada factor.

Después se extiende el modelo para el diseño de la cadena de suministro para maximizar la utilidad. Para ello se plantea un diseño de experimentos factorial fraccionado para la evaluación de los factores de calidad, tiempo de entrega y financiamiento. Una vez establecido el diseño se generan los escenarios y se optimiza cada uno con el modelo desarrollado. Se hace un análisis por medio del análisis de varianza (ANOVA) para determinar los factores que son significativos en los cambios de la utilidad.

Artículo 1

Sometido para publicación en IJCOPI

Minimization of costs in a supply chain considering the impact of quality

Daniel Arturo Olivares Vera¹, Elías Olivares Benítez², Eleazar Puente Rivera³, José Luis Martínez Flores² and Diana Sánchez Partida²

¹ Universidad De La Salle Bajío, México.

² Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), México.

³ Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Campus León, México.

*dolivares@delasalle.edu.mx, elias.olivares@upaep.mx, eleazar.puente@itesm.mx,
joseluis.martinez01@upaep.mx, diana.sanchez@upaep.mx*

Abstract. In this paper, we propose an optimization model to determine the best allocation of orders in a supply chain with four echelons: suppliers, manufacturers, distribution centers and customers. The model takes into account the impact of the costs of quality along the supply chain, besides the costs of transportation, inventory costs, and the purchase costs of the materials. A mixed integer linear model is formulated, in order to make the best allocation of orders. The objective of the model is to minimize the total cost of meeting the demand. A percentage of non-conforming products is calculated based on Process Capability Indices (Cpk). A contribution is the inclusion of costs of quality in the supply chain, in the form of costs of reworks and repairs. These costs are estimated through the use of Cpk indices along the supply chain. Several scenarios are statistically compared using Design of Experiments.

Keywords: Supply Chain, Process Capability, Quality, Mixed Integer Linear Programming.

1 Introduction

When selecting suppliers, companies are using a variety of criteria such as quality, delivery, performance history and quality. Those companies that want to make more effective decisions, are increasingly applying mathematical models for optimization of their operations. The proposed model integrates the impact of quality cost in a supply chain made up of s suppliers who supply m materials to f manufacturers. Manufacturers in turn, deliver p products to d distribution centers that supply p products to c customers as shown in Fig. 1.

The objective function of the proposed allocation model includes the following cost components: rework and reprocessing (estimated from the Cpk index), transportation, manufacture and operating costs. According to existing literature, capability indices such as Cpk are quality metrics that are becoming important success factors of any organization[1], the most important reason is because the companies can

obtain an index to describe the process performance compared to specifications defined by the customer, which helps to simplify the understanding and analysis of processes to improve quality.

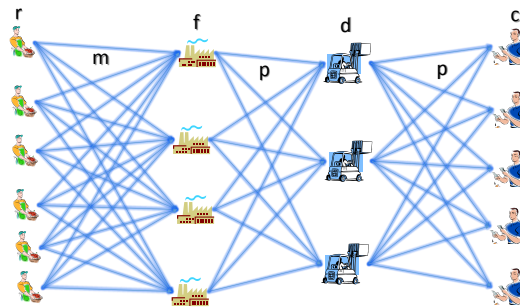


Fig. 1 Supply Chain

This paper makes three contributions. The first is an optimization model to determine the best allocation of orders in a supply chain with four echelons: suppliers, manufacturers, distribution centers and customers, the second is an analysis using a capability index process for to measure the costs of quality in a supply chain, and the third contribution is the application of Design of Experiments for analyzing the impact of different factors.

2 Literature review

In this section are presented two reviews, the first part is about an analysis of investigations for the decisions to purchase in the supply chain where we can find different ways to use quality to measure the performance, and the second part is a investigation about the process capability indices and their calculation and structure.

2.1. Purchase decisions in the Supply Chain

Cost of purchasing is nowadays only one of several criteria that companies take into account when making supply chain decisions regarding selection of suppliers. Quality as measured by process capability indices [2], is another important criterion when selecting suppliers, since product quality is a determinant of overall business performance [3]. Adoption of an effective quality management system into the business process will help to reduce and avoid quality costs in the supply chain [4], [5], [6].

Quality as a decision making criterion in the supply chain has been studied by several researchers, Javid et. al. [7] investigated the effect of product quality and service quality in a two-echelon supply chain. The effect of rework and reprocessing due to poor quality, on inventory decision making has also been studied by Fathollah, M. et. al. [8].

The Costs of Quality (COQ) approach is relevant in supply chain decision making, because it allows to translate the consequences of poor quality, the cost of quality program activities, and the efforts to improve quality, into the financial language of the managers [9]. Osiro et. al. [10], have applied fuzzy decision making concepts for classifying suppliers according to their strengths and weaknesses, including quality criteria in the evaluation.

2.2. Process Capability Indices

Process capability indices are defined as metrics that demonstrate the ability of a process to meet customer specifications. Most frequently used indices, such as C_p and C_{pk} , are based on specifications with respect to a measure of a continuous variable of the product or process [11].

The Equation 1 shows the Capability Index C_p and the following equations show the definition of the Capability Index C_{pk} . Equation 2a represents the calculation of the lower C_{pk} , whereas. Eq. 2b represents the upper C_{pk} calculation. Calculation is based on known values of the lower and upper specification limits, as well as the mean and the standard deviation of the process.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1)$$

$$C_{pkl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \quad (2a)$$

$$C_{pku} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \quad (2b)$$

Process Capability is considered one of the most effective criteria for selecting suppliers of quality products and components [12]. Capability indices have also been used in hypothesis testing based on the F statistic for comparing and selecting suppliers [13]. A chart that integrates capability indices and price information of multiple suppliers, has been proposed as a useful tool for selecting suppliers [2].

The use of Capability Indices as useful criteria for decision making in the supply chain has been extensively investigated both by academics and practitioners [11]. Other authors take into account also multiple criteria such as process yield or hygiene for suppliers evaluation [14]. The perceived impact of the requirements of Quality Assurance Systems (QAS) in the supply chain has been evaluated in many ways like in the case of the Dutch tomato supply chain where the findings of this research indicate that there is a positive perceived impact regarding the effect of the QAS requirements [15].

In conclusion, the reviewed literature supports the idea that quality performance has an important impact on the overall performance of a supply chain, and that quality is one of the most important criteria considered when selecting suppliers. In this investigation, the quality is calculated with costs reworks and repairs through the transformation of C_{pk} in percentage of nonconforming product using design of experiments. This paper describes an optimization model that includes quality, measured through the transformation of capability index as percentage of nonconforming product as a criterion for assigning orders to suppliers in a supply chain.

The use of Capability Indices imposes some strong theoretical assumptions that should be validated in order to use the suggested model with real data. One assumption is that the production process of the supplier must be under statistical control, other important assumption is that the variable used for calculating the index follows a Normal distribution.

3 Strategic decision model

This section includes a problem statement, indices, parameters and decision variables, mathematical modelling, numerical example and finally the solution procedure.

3.1. Problem statement

This section provides a statement of the problem, which has been formulated as a mixed-integer linear program. The problem is fully explained and a numerical example is also provided.

In order to compute the cost of quality, it is convenient to classify products that are not perfect into four groups: perfect, imperfect, defective but reworkable and non-reworkable defective items [8].

The total cost of quality (*TCQ*) is the sum of the costs of quality in each link of the supply chain. The quality costs of suppliers, manufacturers and distribution centers are named $RRTR_{mrf}$, $RRTF_{pfd}$ and $RRTD_{pdc}$ respectively. In the following paragraphs an example of the calculations is presented, for the case of the suppliers that provide materials to the manufacturers. Quality costs between other echelons are computed similarly.

As it was said before, it is assumed that quality is determined under the criteria of two-sided specification limits, with respect to a continuous normal variable. Equation 3 show the calculations for the process capability indices C_p , equations 4a and 4b show the calculations for the upper and lower process capability indices C_{pku} and C_{pkL} :

$$C_{pCR_{mrf}} = \frac{USL_{mrf} - LSL_{mrf}}{6\sigma_{mrf}} \quad (3)$$

$$C_{pkL_{CR_{mrf}}} = \frac{\mu_{mrf} - LSL_{mrf}}{3\sigma_{mrf}} \quad (4a)$$

$$C_{pku_{CR_{mrf}}} = \frac{USL_{mrf} - \mu_{mrf}}{3\sigma_{mrf}} \quad (4b)$$

These equations correspond to the C_{pk} indices of the material m sent by the supplier r to the manufacturer f . The computed C_{pk} 's are then used to determine the percentage of non-conforming material or product, according to the equation 5. Φ Values represent cumulative probabilities under the normal standard distribution. Non-conforming materials (% NC) or parts have values greater than the USL or less than the LSL in the critical variable [1]. Fig. 2 shows the percentage of non-conforming product.

$$\%NC = 1 - \Phi\left(\frac{USL - \mu}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{\mu - LSL}{\sigma}\right) \quad (5)$$

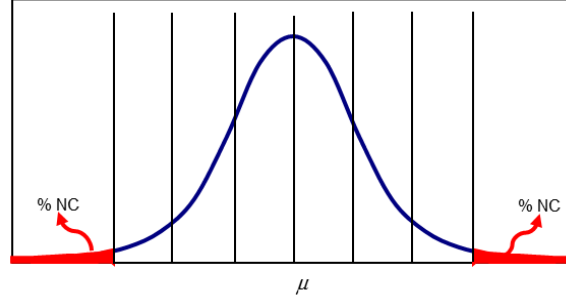


Fig. 2 Percentage of non-conforming product.

After obtaining the percentage of products that do not meet specifications, non-conforming items are classified into two categories: rework and repair.

- Rework: Bringing a non-conforming part back into conformance by simply reprocessing a prior sequence or a step of the standard process.
- Repair: Bringing a non-conforming part back into conformance using methods outside the original process [16], [17], [18]. See Fig. 3 Rework and Repairs.

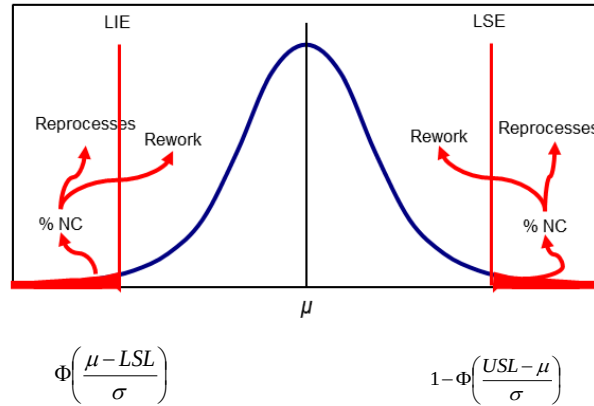


Fig. 3 Rework and Repair processes

In order to estimate the expected quality cost between echelons, it is necessary to know the rates of rework ($TRPR_{mrf}$) and repair ($TRTR_{mrf}$) in which non-conforming product is divided in each link, since bringing a non-conforming product into conformance has a different cost in each case. The parameters RR and RTR refer to the unit cost of rework and repair respectively. Equation 6 shows the total cost of reworks and repairs in the entire supply chain. In this equation QR represents the volume of raw material m that the supplier r delivers to the manufacturer f . The probability of non-conforming product has been expressed in terms of Cpk , since the standard deviation of the process is being estimated from the index.

$$RRTR_{mrf} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \left\{ QR_{mrf} \cdot \left[\left(\Phi R_{mrf} \right) \cdot \left(-3CpkICR_{mrf} \right) + \left(\Phi R_{mrf} \right) \cdot \left(-3(2CpCR_{mrf} - CpkUCR_{mrf}) \right) \right] \cdot \left(RR_{mrf} \cdot TRPR_{mrf} + RTR_{mrf} \cdot TRTR_{mrf} \right) \right\} \quad (6)$$

There are other cost items that have to be added into the total cost of the supply chain: the cost of purchased raw materials (*COSTMP*), the production cost of the end items (*PRODUCE*), the transportation costs (*TRANSPORT*) from the point of origin to the final destination, and the operating costs of each node in the supply chain (*OPERATING*). Equations 7 to 10 show the calculation of each cost component.

$$COSTMP_{mrf} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R (QR_{mrf} \cdot PR_{mr}) \quad (7)$$

$$PRODUCE = \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F (FA_{pf} \cdot VOLFAB_{pf}) \quad (8)$$

$$TRANSPORT = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F (MT_{mrf} \cdot QR_{mrf}) + \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F \sum_{d=1}^D (AB_{pfd} \cdot QF_{pfd}) + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C (YM_{pdc} \cdot QD_{pdc}) \quad (9)$$

$$OPERATING = \sum_{r=1}^R (DY_r \cdot YPROV_r) + \sum_{f=1}^F (FF_f \cdot YFABR_f) + \sum_{d=1}^D (DA_d \cdot YCD_d) \quad (10)$$

The model includes binary decision variables (*Y*) that will indicate whether a facility should be operating or not. Demand and capacity constraints are also included in the mixed-integer linear program formulation.

3.2. Indices, parameters and decision variables

The model includes the following section defines the indices and parameters to be used in the strategic GSC model:

Indices:

<i>m</i>	material
<i>p</i>	product
<i>r</i>	supplier
<i>f</i>	manufacturer
<i>d</i>	distribution center
<i>c</i>	customer

Parameters:

Quality

<i>RRTR_{mrf}</i>	Total cost of quality material <i>m</i> sent from supplier <i>r</i> to manufacturer <i>f</i>
<i>RRTF_{pfd}</i>	Total cost of product quality <i>p</i> sent to manufacturer <i>f</i> to distribution center <i>d</i>
<i>RRTD_{pdc}</i>	Total cost of product quality <i>p</i> sent to distribution center <i>d</i> to customer <i>c</i>
<i>CpCR_{mrf}</i>	Potential capability index <i>Cp</i> for each supplier <i>r</i>
<i>CpCF_{pfd}</i>	Potential capability index <i>Cp</i> for each manufacturer <i>f</i>
<i>CpCD_{pdc}</i>	Potential capability index <i>Cp</i> for each distribution center <i>d</i>
<i>CpkCR_{mrf}</i>	Real capability index <i>Cpk</i> for each supplier <i>r</i>

$CpkCF_{pfd}$	Real capability index Cpk for each manufacturer f
$CpkCD_{pdc}$	Real capability index Cpk for each distribution center d
$CpkuCR_{mrf}$	Upper capability index Cpk for each provider r
$CpkuCF_{pfd}$	Upper capability index Cpk for each manufacturer f
$CpkuCD_{pdc}$	Upper capability index Cpk for each distribution center d
$CpklCR_{mrf}$	Lower capability index Cpk for each provider r
$CpklCF_{pfd}$	Lower capability index Cpk for each manufacturer f
$CpklCD_{pdc}$	Lower capability index Cpk for each distribution center d
RR_{mrf}	Cost of rework of material m from supplier r to manufacturer f
RTR_{mrf}	Cost of repair material m from supplier r to manufacturer f
$TRPR_{mrf}$	Rework rate of material m from supplier r to manufacturer f
$TRTR_{mrf}$	Repair rate of material m from supplier r to manufacturer f
RF_{pfd}	Cost of rework of product p from manufacturer f to distribution center d
RTF_{pfd}	Cost of repair of product p from manufacturer f to distribution center d
$TRPF_{pfd}$	Repair rate of product p from manufacturer f to distribution center d
$TRTF_{pfd}$	Rework rate of product p from manufacturer f to distribution center d
RD_{pdc}	Cost of rework product p form distribution center d to customer c
RTD_{pdc}	Cost of repairing product p form distribution center to customer c
$TRPD_{pdc}$	Rate of product rework p form distribution center d to customer
$TRTD_{pdc}$	Rate of product repair p form distribution center d to customer c
DY_r	Operation costs of the supplier r
FF_f	Operation costs of the manufacturer f
DA_d	Operation costs of the distribution center d
DOA_f	Production capacity of the manufacturer f
DOV_d	Capacity of the distribution center d
DEM_{pc}	Demand of product p by the customer c
BV_{mr}	Availability of material m from the supplier r
MT_{mrf}	Unit cost of transporting material m from supplier f to manufacturer m
AB_{pfd}	Unit cost of transporting product p from manufacturer f to the distribution center d
YM_{pdc}	Unit cost of transporting product p from distribution center d to customer c
PO_{mp}	Amount of material m required to produce one unit of product p
FA_{pf}	Unit production cost of product p produced by the manufacturer f
PR_{mr}	Price of the material m provided by the supplier r
$VOLMP_{mf}$	Received volume of material m by manufacturer f
$VOLMP_{pf}$	Transformed volume of each product p by manufacturer f
ΦR_{mrf}	Cumulative probability function of the critical variable of material m provided from supplier r to manufacturer f
ΦF_{pfd}	Cumulative probability function of the critical variable of product p provided from manufacturer f to the distribution center c
ΦD_{pdc}	Cumulative probability function of the critical variable of product p from distribution center d to customer c

Decision Variables

QR_{mrf}	Volume of material m from supplier s to the manufacturer r
------------	--

QF_{pfd}	Volume of product p from manufacturer f to the distribution center d
QD_{pdc}	Volume of product p from distribution center d to the customer c
$YPROV_r$	Binary variable that indicates (1), if supplier r operates, (0) otherwise
$YFABR_f$	Binary variable that indicates (1), if manufacturer f operates, (0) otherwise
YCD_d	Binary variable that indicates (1), if distribution center d operates, (0) otherwise

3.3. Mathematical Modelling

The model objective is represented in Eq. (11) where objective is minimize the costs

Objective function: Minimize Total Cost
(11)

The total cost is presented in Eq. (12) which includes the cost of quality, raw material cost, produce cost, transportation cost and operating cost.

$$\text{Total Cost} = TCQ + COSTMP + PRODUCE + TRANSPORTATION + OPERATING \quad (12)$$

The total cost of quality shown in Eq. (13), includes the cost of quality between supplier-manufacturer echelons, manufacturer-distribution center echelons and distribution center-costumer echelons:

$$TCQ = RRTR_{mrf} + RRTF_{pfd} + RRTD_{pdc} \quad (13)$$

The calculating process potencial capability indices of suppliers is shown in Eq. (14):

$$CpCR_{mrf} = \frac{USL_{mrf} - LSL_{mrf}}{6\sigma_{mrf}} \quad (14)$$

The calculating process real capability indices of suppliers is shown in Eqs. (15), (16) and (17):

$$CpkuCR_{mrf} = \frac{USL_{mrf} - \mu_{mrf}}{3\sigma_{mrf}} \quad (15)$$

$$CpklCR_{mrf} = \frac{\mu_{mrf} - LSL_{mrf}}{3\sigma_{mrf}} \quad (16)$$

$$CpkCR_{mrf} = \min \{CpkuCR_{mrf}, CpklCR_{mrf}\} \quad (17)$$

The Costo of Quality for Reworks and Repairs Costs between supplier-manufacturer echelons is shown in Eq. (18):

$$RRTR_{mrf} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \left\{ QR_{mrf} \cdot \left[\left(\Phi R_{mrf} \left(-3CpklCR_{mrf} \right) \right) + \left(\Phi R_{mrf} \left(-3 \left(2CpCR_{mrf} - CpkuCR_{mrf} \right) \right) \right) \right] \right\} \\ \left[\left(RR_{mrf} \cdot TRPR_{mrf} \right) + \left(RTR_{mrf} \cdot TRTR_{mrf} \right) \right] \quad (18)$$

The calculating process potencial capability indices of manufacturers is shown in Eq. (19):

$$CpCF_{pfd} = \frac{USL_{pfd} - LSL_{pfd}}{6\sigma_{pfd}} \quad (19)$$

The calculating process real capability indices of manufacturers is shown in Eqs. (20), (21) and (22):

$$CpkuCF_{pfd} = \frac{USL_{pfd} - \mu_{pfd}}{3\sigma_{pfd}} \quad (20)$$

$$CpklCF_{pfd} = \frac{\mu_{pfd} - LSL_{pfd}}{3\sigma_{pfd}} \quad (21)$$

$$CpkCF_{pfd} = \min \{ CpkuCF_{pfd}, CpklCF_{pfd} \} \quad (22)$$

The Costo of Quality for Reworks and Repairs Costs between manufacturer – distribution center echelons is shown in Eq. (23):

$$RRTF_{pfd} = \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F \sum_{d=1}^D \left\{ QF_{pfd} \cdot \left[\left(\Phi F_{pfd} \left(-3CpklCF_{pfd} \right) \right) + \left(\Phi F_{pfd} \left(-3 \left(2CpCF_{pfd} - CpkuCF_{pfd} \right) \right) \right) \right] \right\} \\ \left[\left(RF_{pfd} \cdot TRPF_{pfd} \right) + \left(RTF_{pfd} \cdot TRTF_{pfd} \right) \right] \quad (23)$$

The calculating process potencial capability indices at the Distribution Center is shown in Eq. (24):

$$CpCD_{pdc} = \frac{USL_{pdc} - LSL_{pdc}}{6\sigma_{pdc}} \quad (24)$$

The calculating process real capability indices at the Distribution Center is shown in Eqs. (25), (26) and (27):

$$CpkuCD_{pdc} = \frac{USL_{pdc} - \mu_{pdc}}{3\sigma_{pdc}} \quad (25)$$

$$CpklCD_{pdc} = \frac{\mu_{pdc} - LSL_{pdc}}{3\sigma_{pdc}} \quad (26)$$

$$CpkCD_{pdc} = \min\{CpkuCR_{pdc}, CpklCR_{pdc}\} \quad (27)$$

The Costo of Quality for Reworks and Repairs Costs between distribution center- customer echelons is shown in Eq. (28):

$$RRTD_{pdc} = \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \{QD_{pdc} \cdot [(\Phi D_{pdc}(-3CpklCD_{pdc})) + (\Phi D_{pdc}(-3(2CpCD_{pdc} - CpkuCD_{pdc})))]\} \\ \cdot [(RD_{pdc} \cdot TRPD_{pdc}) + (RTD_{pdc} \cdot TRTD_{pdc})] \quad (28)$$

The Purchase Cost of Raw Material is shown in Eq. (29):

$$COSTMP = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R (QR_{mrf} \cdot PR_{mr}) \quad (29)$$

The Production Cost at the manufacturers is shown in Eq. (30):

$$PRODUCE = \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F (FA_{pf} \cdot VOLFAB_{pf}) \quad (30)$$

The transportation costs from suppliers to manufacturers, from manufacturers to distribution centers and from distribution centers to customers as shown in Eq.(31):

$$TRANSPORT = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F (MT_{mrf} \cdot QR_{mrf}) + \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F \sum_{d=1}^D (AB_{pfd} \cdot QF_{pfd}) + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C (YM_{pdc} \cdot QD_{pdc}) \quad (31)$$

The operating costs of suppliers, manufacturers and distribution centers, associated with a binary decision variable as shown in Eq.(32):

$$OPERATING = \sum_{r=1}^R (DY_r \cdot YPROV_r) + \sum_{f=1}^F (FF_f \cdot YFABR_f) + \sum_{d=1}^D (DA_d \cdot YCD_d) \quad (32)$$

S.t.

CONSTRAINTS

The demand of each product at each customer node must be met, as shown in Eq. (33).

$$\text{Demand} \quad \sum_{d=1}^D QD_{pdc} \geq DEM_{pc} \quad \forall p, c \quad (33)$$

The Manufacturers Capacity Constraints (shipping must not exceed production capacity) as shown in Eq. (34):

$$\text{Manufacturers Capacity} \quad \sum_{d=1}^D QF_{pfd} \leq VOLFAB_{pf} \quad \forall p, f \quad (34)$$

The Available capacity constraint (capacity is available only if the plant is operating) as shown in Eq. (35):

$$\text{Production} \quad \sum_{p=1}^P VOLFAB_{pf} \leq DOA_f \cdot YFABR_f \quad \forall f \quad (35)$$

The Storing capacity available only if distribution center is operating as shown in Eq. (36):

$$\text{Warehouse} \quad \sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C QD_{pdc} \leq DOV_d \cdot YCD_d \quad \forall d \quad (36)$$

A conversion constraint that ensures that the volume of raw material shipped by the suppliers is greater than or equal to the amount of raw material required by the manufacturer as shown in Eq.(37):

$$\sum_{p=1}^P VOLFAB_{fp} \cdot PO_{mp} \leq \sum_{r=1}^R QR_{mrf} \quad \forall m, f \quad (37)$$

The Constraint enforcing that the received raw material is transformed into product as shown in Eq.(38):

$$VOLMP_{mf} \geq \sum_{p=1}^P VOLFAB_{fp} \cdot PO_{mp} \quad \forall m, f \quad (38)$$

The Volume of raw material received by the manufacturers must not exceed the capacity of the suppliers as shown in Eq. (39):

$$VOLMP_{mf} \leq \sum_{r=1}^R QR_{mrf} \quad \forall m, f \quad (39)$$

The volume of raw material shipped to the manufacturer is less than or equal that the available capacity of each supplier as shown in Eq. (40):

$$\sum_{f=1}^F QR_{mrf} \leq BV_{mr} \cdot YPROV_r \quad \forall m, r \quad (40)$$

A distribution center can receive product from manufacturers only if it is operating as shown in Eq. (41):

$$\sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F QF_{pfd} \leq DOV_d \cdot YCD_d \quad \forall d \quad (41)$$

The Volume of product shipped to the customer must not exceed the amount received from the manufacturers as shown in Eq. (42):

$$\sum_{f=1}^F QF_{pfd} \geq \sum_{c=1}^C QD_{pdc} \quad \forall p, d \quad (42)$$

3.4. Numerical Example.

In the numerical example, a four-echelon supply chain is modeled. The supply chain is composed of 40 suppliers that provide 30 types of materials to 30 manufacturers, in the other side the manufacturers deliver 20 different products to 30 distribution centers. Distribution centers supply those 20 products to 40 customers. Customers demand must be met. In Table 1, the instance parameters are shown for show the relation in each echelon for to ilustrd a supply chain with several interactions among them:

Table 1. Instance parameters

Indices	Concept	Quantity
m	material	30
p	product	20
r	supplier	40
f	manufacturer	30
d	distribution cent	30
c	customer	40

Two sets of comparative analyses will be developed. For the first set, three capacity scenarios will be tested: High Capacity, with the capacity of each node set 55% above its demand; Medium Capacity, with a capacity 35% greater than the demand, and a Low Capacity scenario with a capacity set 25% above the demand. Customer demands are randomly generated. For each scenario, 5 replicates will be solved in order to find the optimal assignment of orders in the supply chain. Scenarios are then compared in terms of the average total costs in each echelon.

For the second set of comparisons, the quality performance of the nodes is included. Three quality scenarios will be tested: High Quality, Medium Quality and Low Quality. Scenarios are defined in terms of the defect rate in each echelon of the supply chain. Defect rates are assigned as shown in Table 2.

Table 2. The defect rate rate in each echelon of the supply

	Range of Defects Rate for each scenario and echelon		
	High Quality	Medium Quality	Low Quality
Supplier	0.00 - 0.03	0.04 - 0.08	0.09 - 0.14
Manufacturer	0.00 - 0.05	0.06 - 0.11	0.12 - 0.20
Distribution Center	0.00 - 0.04	0.05 - 0.09	0.10 - 0.16

The combination of three levels of capacity and three levels of quality produces nine different scenarios to be tested. For each scenario five replicates are solved, and the average total cost in each echelon is computed. Optimal results are compared using a 3^k experimental design.

3.5. Solution Procedure

The proposed model presented in section 3.3 was solved using the GAMS-CPLEX software on an Intel Core 3, 3.0 GB of RAM, 2.27 GHZ processor PC processor. The model includes a total of 82,068 decision variables, of which 18,100 are binary variables. It took 630 minutes in total to obtain a global optimal solution considering all scenarios.

4 Results

This section includes analysis in two scenarios: one is about a scenario with different levels of capacity and the second analysis is a scenario with three different levels of capacity and quality.

4.1. Scenario Analysis with different levels of capacity.

The first scenario to be analyzed is the one in which the capacity of the nodes was set at three different levels, five replicates for each level were randomly generated, and therefore five observations for each level of capacity are included in the analysis. A one-way ANOVA was performed taking the capacity as the test factor with three levels, High, Medium and Low. The response variable is the total cost in the supply chain. The results of the analysis are shown in Table 3.

Table 3. ANOVA Cost by Capacity

<i>Source of Variation</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>
Between groups	2.65234 E7	2	1.32617 E7	0.02	0.9841
Within groups	9.9271 E9	12	8.27258 E8		
Total	9.95362 E9	14			

No significant differences in the mean of the total cost were found. The average total cost of the 5 replicates is highest for the low capacity scenario and lowest for the medium capacity scenario; however these differences are not statistically significant. Figure 4 shows the Box and whisker chart.

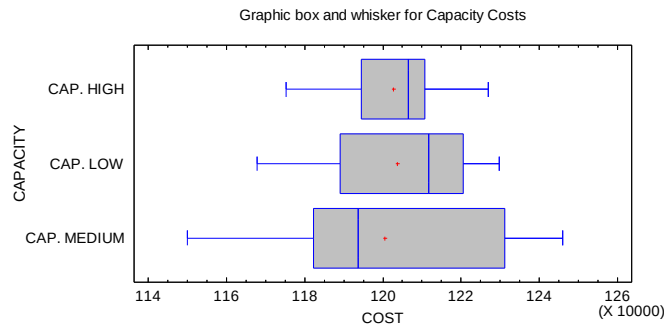


Fig. 4 Graphic box and whisker for Capacity Costs.

Since the formulation of the model requires that the total demand of each customer must be met, and capacities have considerable slack along the entire supply chain, there are no significant differences in the average total cost and in the contribution of each cost item to the total cost. The figure 5 shows the Total Cost.

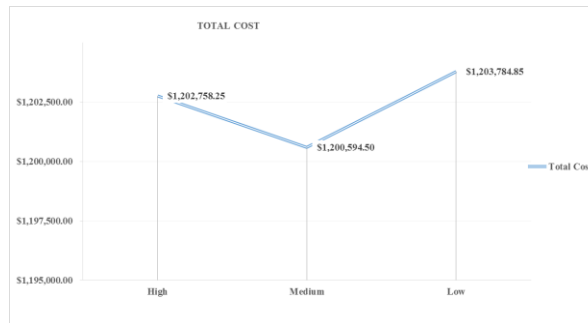


Fig. 5 Total cost

4.2. Scenario Analysis with three different levels of capacity and quality.

As it was explained in section of the description of the problem, in order to quantify the impact of quality on the costs of the supply chain, the cost of reworks and repairs is to be included. A 3^2 factorial experimental design was formulated for the analysis. The two factors to be considered are Capacity and Quality, each factor with three levels (High, Medium and Low). The design generates nine combinations; five replicates were randomly generated for each combination.

A summary of the results is shown in Table 4. It can be observed that the scenarios with the lowest total costs are those in which quality is high. The greatest differences in cost correspond to the different levels of quality. The effect of capacity is not so relevant, although the overall minimum cost occurs in the high quality – high capacity scenario. In the table are shown the average total cost for the five replicates of each scenario and the average of each of the cost components included in the model.

Table 4. Average Total Cost and Average of the Cost Components

Capacity	Quality	Total Costs	Quality	Raw Material	Production	Transportation	Operation
Cap. High	Q. High	\$ 1,363,791.78	\$ 48,327.48	\$ 199,502.50	\$ 173,541.20	\$ 826,292.40	\$ 116,128.20
	Q. Medium	\$ 1,643,796.09	\$ 313,051.70	\$ 202,853.59	\$ 176,412.40	\$ 835,039.20	\$ 116,439.20
	Q. Low	\$ 1,964,808.88	\$ 626,798.77	\$ 203,060.91	\$ 176,674.60	\$ 836,490.40	\$ 121,784.20
Cap. Medium	Q. High	\$ 1,381,823.17	\$ 52,377.71	\$ 199,646.65	\$ 174,919.00	\$ 825,520.60	\$ 129,359.20
	Q. Medium	\$ 1,662,024.62	\$ 316,778.46	\$ 204,516.36	\$ 175,893.40	\$ 840,528.00	\$ 124,308.40
	Q. Low	\$ 1,988,666.45	\$ 635,340.99	\$ 204,581.27	\$ 176,474.60	\$ 839,805.20	\$ 132,464.40
Cap. Low	Q. High	\$ 1,394,930.05	\$ 54,240.61	\$ 201,466.03	\$ 174,256.00	\$ 828,834.80	\$ 136,132.60
	Q. Medium	\$ 1,674,849.51	\$ 315,370.86	\$ 204,392.25	\$ 178,092.00	\$ 839,713.00	\$ 137,281.40
	Q. Low	\$ 1,986,317.26	\$ 640,610.66	\$ 203,132.40	\$ 175,798.40	\$ 832,536.40	\$ 134,239.40

Tables 5 show the results of a two-way ANOVA and In Table 6 the non-significant effects have been excluded. The most significant effect on total cost is the level of quality. The effect of capacity is also statistically significant, but the differences are much more moderated. Figure 6 shows a Standardized Pareto Chart, and Figure 7 shows the main effects plot.

Table 5. Results of Analysis of Variance for Cost (all effects included)

Source of Variation	Sum of Squares	df	Mean Square	F	P-Value
A:Capacity	5.83808E9	1	5.83808E9	6.55	0.0149
B:Quality	2.69774E12	1	2.69774E12	3028.93	0.0000
AA	3.70778E8	1	3.70778E8	0.42	0.5230
AB	1.15919E8	1	1.15919E8	0.13	0.7204
BB	3.93342E9	1	3.93342E9	4.42	0.0429
bloques	3.4486E9	4	8.62149E8	0.97	0.4373
Error total	3.11731E10	35	8.9066E8		
Total (corr.)	2.74262E12	44			

R-Sq = **98.8634 %**

R-Sq (adj.) = **98.7177 %**

Error estándar del est. = 29843.9

Error absoluto medio = 20223.7

Estadístico Durbin-Watson = 1.77265 (P=0.0704)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.110146

Table 6. Results of Analysis of Variance for Cost (only significant effects)

Source of Variation	Sum of Squares	df	Mean Square	F	P-Value
A:Capacity	5.83808E9	1	5.83808E9	6.82	0.0126
B:Quality	2.69774E12	1	2.69774E12	3150.46	0.0000
BB	3.93342E9	1	3.93342E9	4.59	0.0381
Error	3.51084E10	41	8.56302E8		
Total	2.74262E12	44			

R-cuadrada = **98.7199 %**
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = **98.6262 %**
Error estándar del est. = 29262.6
Error absoluto medio = 22390.9
Estadístico Durbin-Watson = 1.649 (P=0.1022)
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.172421

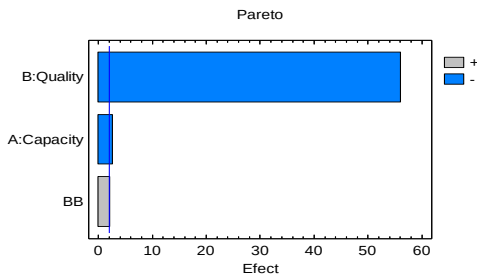


Fig. 6 Standardized Pareto Chart

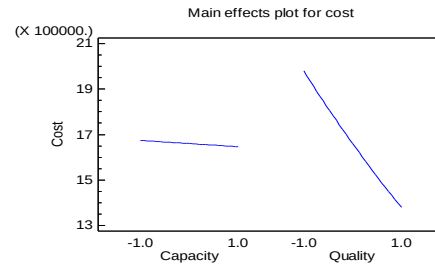


Fig. 7 Main effects plot for cost

The Box and Whisker chart in Fig. 8 summarizes the results in a visual way. It becomes evident that there are clearly three vertical groups corresponding to the levels of quality, and within each group small differences can be observed corresponding to the levels of capacity.

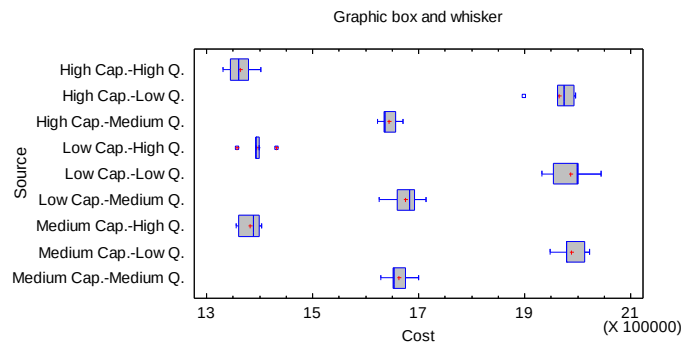


Fig. 8 Graphic box and whisker

Fig. 9 shows the overall behavior of the cost components, it can be observed that the variability resulting in the Total Cost is originated by the variability of Quality costs. In Table 7 the proportion of each cost component is shown.

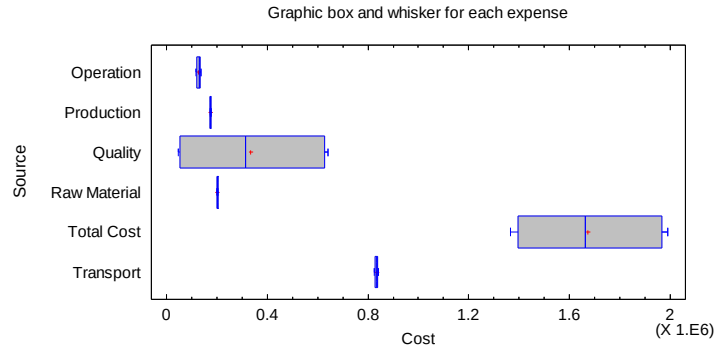


Fig. 9 Graphic box and whisker for each expense

Table 7. Percentage of cost components with respect to total cost.

Capacity	Quality	Total Costs	Quality	Raw Material	Production	Transportation	Operation
High	High	100%	4%	15%	13%	61%	9%
	Medium	100%	19%	12%	11%	51%	7%
	Low	100%	32%	10%	9%	43%	6%
Medium	High	100%	4%	14%	13%	60%	10%
	Medium	100%	19%	12%	11%	51%	7%
	Low	100%	32%	10%	9%	42%	7%
Low	High	100%	4%	14%	12%	59%	10%
	Medium	100%	19%	12%	11%	51%	7%
	Low	100%	32%	10%	9%	42%	7%

Finally, in the graph of operating costs expressed in Fig. 10 is observed that these are increasing as the capacity decreases; it is noteworthy that the change in these costs does not affect a change in the decision model, because operating costs represent about 7 percent on average of total costs.



Fig. 10 Operating costs

5 Conclusions

Even though the coefficients for the model were randomly generated instead of using real field data, all the relevant costs are considered in the model to minimize the total cost in the supply chain. The results confirm that the most cost-effective allocation of orders in the supply chain does not necessarily include the cheapest suppliers.

One contribution of this research is the calculation of quality costs through the use of the Cpk indices, which were transformed into percentages of non conforming product. These percentages are taken as a basis for estimating the costs of reworks and repairs. Another contribution is the application of Design of Experiments for analyzing the impact of different factors that formed a set of scenarios, including different levels of performance of the nodes of the supply chain.

In this research, different quality scenarios show the importance of the quality in the costs. The impact of quality is statistically significant in the analysis, whereas differences in capacities do not have a significant effect on the total cost. On the other hand the transportation cost is the most important cost, because it represents the highest cost component, however this cost does not affect radically in the solution, because it shows a relatively constant behavior among different scenarios.

A future model could include the costs related to late and early deliveries and it is being considered as an opportunity for future research, as well as the consideration of possible non-linearities in the behavior of the costs. Another option is to include the financial cost to fulfill the customer demand in order to reach more solid results.

A logical extension of the research is to use real data from a supply chain and to validate the resulting decisions with practitioners.

References

1. Pearn, W. L., & Kotz, S. Encyclopedia and Handbook of Process Capability Indices: A Comprehensive Exposition of Quality Control Measures (Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics). World Scientific Publishing Co., Inc. (2006)
2. Linn, R. J., Tsung, F., & Ellis, L. W. C. Supplier selection based on process capability and price analysis. *Quality Engineering*, 18(2), 123-129 (2006)
3. Agus, A. The strategic supplier partnership in a supply chain management with quality and business performance. *International Journal of Business and Management Science*, 1(2), 129 (2008)
4. Das, K. A quality integrated strategic level global supply chain model. *International Journal of Production Research*, 49(1), 5-31 (2011)
5. Kumar, S., McCreary, M. L., & Nottestad, D. A. Quantifying supply chain trade-offs using six sigma, simulation, and designed experiments to develop a flexible distribution network. *Quality Engineering*, 23(2), 180-203 (2011)
6. Madadi, A., Kurz, M. E., Mason, S. J., & Taaffe, K. M. Supply chain design under quality disruptions and tainted materials delivery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 67, 105-123 (2014)
7. Javid, A. A., & Hoseinpour, P. A model for quality management in a supply chain with a retailer and a manufacturer. *South African Journal of Industrial Engineering*, 21(1), 103-111 (2010)
8. Fathollah Bayati, M., Rasti Barzoki, M., & Hejazi, S. R. A joint lot-sizing and marketing model with reworks, scraps and imperfect products. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2(2), 395-408 (2011)
9. Castillo-Villar, K. K., Smith, N. R., & Simonton, J. L. A model for supply chain design considering the cost of quality. *Applied Mathematical Modelling*, 36(12), 5920-5935 (2012)
10. Osiro, L., Lima-Junior, F. R., & Carpinetti, L. C. R. A fuzzy logic approach to supplier evaluation for development. *International Journal of Production Economics*, 153, 95-112 (2014)
11. Cudney, E. A., & Kestle, R. Implementing Lean Six Sigma Throughout the Supply Chain: The Comprehensive and Transparent Case Study. CRC Press (2010)

12. Asokan, M. V., & Unnithan, V. K. G. Estimation of vendor's process capability from the lots screened to meet specifications. *Quality Engineering*, 11(4), 537-540 (1999)
13. Chou, Y. M. Selecting a better supplier by testing process capability indices. *Quality Engineering*, 6(3), 427-438 (1994)
14. Shen, C. Y., & Yu, K. T. An integrated fuzzy strategic supplier selection approach for considering the supplier integration spectrum. *International Journal of Production Research*, 50(3), 817-829 (2012)
15. Aramyan, L. H., Meuwissen, M. P., Oude Lansink, A. G., van der Vorst, J. G., van Kooten, O., & Van der Lans, I. A. The perceived impact of quality assurance systems on tomato supply chain performance. *Total Quality Management*, 20(6), 633-653 (2009)
16. The European Chemical Industry Council CEFIC. Good manufacturing practices for active ingredient manufacturers. European Federation of Pharmaceutical Industries (1996)
17. Diario Oficial de la Federación de México. Buenas prácticas de fabricación para establecimientos de la industria químico farmacéutica dedicados a la fabricación de medicamentos NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SSA1-2006. [en línea]. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4888628&fecha=31/07/1998 [2016, 5 de marzo] (31 de julio de 1998)
18. Gregorio Cabrero, R. Gestión de una planta productiva con el uso de indicadores Lean Manufacturing (2014)

Sometido para publicación en Nova Scientia

Revista Electrónica Nova Scientia

Maximización de la Utilidad en la Cadena de Suministro Considerando variación en Capacidad, Calidad, Tiempo de Entrega y Tasa de Interés

Daniel Arturo Olivares Vera¹, Elías Olivares Benítez², Eleazar Puente Rivera³, José Luis Martínez Flores², Diana Sánchez Partida²

¹Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad De La Salle Bajío, Av. Universidad 602, Col. Lomas del Campestre, León, Gto., México.

²Centro Interdisciplinario de Posgrados, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), Calle 21 Sur No.1103, Barrio Santiago, 72410 Puebla, México.

³Departamento de Ingeniería, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Av. Eugenio Garza Sada S/N, Col. Cerro Gordo, León, Gto., México.

México

Daniel Artuto Olivares-Vera. E-mail: dolivares@delasalle.edu.mx

Resumen

El modelo propuesto analiza la mejor asignación de órdenes de pedidos de materia prima y productos en una cadena de suministro con estructura de cuatro eslabones conformados por: proveedor, fabricante, centro de distribución y cliente. El problema se modela como un programa lineal entero mixto que se resuelve con software comercial de optimización. Se hace un análisis del impacto que se tiene en la utilidad ante diversos cambios en niveles de: capacidad, calidad, tiempo de entrega y tasa de interés en cuanto a la decisión de asignación de pedidos de materia prima y productos para satisfacer la demanda del cliente. Este análisis se realiza por medio de un diseño de experimentos factorial fraccionado para estimar el impacto de los cambios mencionados. Desde el punto de vista de costos, el costo de transporte es el más relevante. Considerando la variabilidad, la calidad es el factor que ofrece mayor oportunidad de mejora a la utilidad. Este modelo puede ser aplicable a diversas industrias.

Palabras Clave: Cadena de Suministro, Calidad, Tiempo de Entrega, Tasa de Interés, Programación Lineal Entera Mixta.

Abstract

The proposed model analyzes the best allocation of orders of raw materials and products in a four-echelon supply chain. The four echelons are conformed by suppliers, manufacturers, distribution centers and customers. The optimization model is formulated as a Mixed Integer Linear Problem, and it is solved using a commercial software tool. The objective function of the model is profit maximization. A set of different scenarios was tested, in order to analyze the impact of capacity, quality, delivery time and interest rate on the profits level, these variables were introduced as factors in a fractional-factorial design of experiments. The results show that the transportation cost is the most relevant cost component. The most important opportunity for profit improvement is found in the factor of quality. The proposed model can be adapted to different industries.

Keywords: Supply Chain, Quality, Delivery Time, Interest Rate, Mixed Integer Linear Programming.

Introducción: La propuesta consiste en proveer un modelo de asignación para maximizar la utilidad en el cual se evalúe el impacto dependiendo de los cambios observados en distintos niveles de capacidad, calidad, tiempo de entrega y la Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio (TIIE). Este modelo es aplicado a una cadena de suministro que está compuesta por r proveedores que abastecen m materiales a f fabricantes que suministran p productos a d centros de distribución que los envían a c clientes tal como se ilustra en la Fig. 1. El modelo asegura tomar la decisión de asignación que dé la mayor utilidad tomando en cuenta los costos incurridos. El documento está compuesto por una sección de revisión literaria, seguida por una sección de la descripción del problema y modelación matemática, una sección más del ejemplo numérico con la demostración de las decisiones tomadas con el modelo, y finalmente una sección de conclusiones y futuras líneas de investigación.

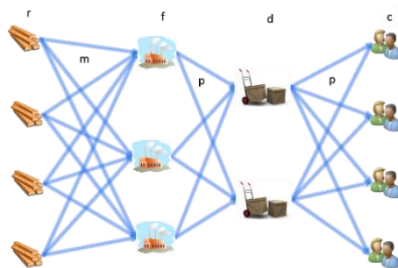


Fig. 1 Cadena de Suministro

Revisión de Literatura

La Calidad en la Cadena de Suministro e índices de Capacidad de Proceso (C_p y C_{pk})

La cadena de suministro y la calidad han sido abordados desde distintos enfoques, tales como la calidad del producto y la calidad del servicio (Hsu et al., 2009; Franca et al., 2010; Javid & Hoseinpour, 2010; Das, 2011; Elahi et al., 2011), los reprocesos y retrabajos en modelos de inventarios (Fathollah et al., 2011), los costos de calidad (Castillo-Villar et al., 2012) y la integración de índices de capacidad para la evaluación de productos y desempeño de organizaciones (Asokan & Unnithan, 1999; Chan et al., 1991; Kane, 1986; Johnson & Kotz, 2002; Pearn & Kotz, 2006), entre otros.

Para considerar el factor de calidad en la cadena de suministro, un enfoque ampliamente utilizado es concretarlo en el costo de calidad (COQ) (Castillo-Villar et al., 2012). Para obtener el costo de la calidad se estima el porcentaje de producto que no cumple

especificaciones usando el índice de capacidad de proceso (Cpk), y se multiplica por el costo relacionado a los reprocesos y retrabajos.

Los índices de capacidad de proceso (Cp o Cpk) definen la capacidad de un proceso para cumplir con las especificaciones del cliente, la Ec. (1) representa el cálculo del Cp el cual se realiza con el límite superior de especificación (USL), el límite inferior de especificación (LSL) y la desviación estándar (σ). La Ec. (2a) representa el cálculo del $Cpkl$ inferior el cual se realiza con la media (μ), el límite inferior de especificación (LSL) y la desviación estándar (σ). La Ec. (2b) representa el cálculo del $Cpku$ superior el cual se realiza con el límite superior de especificación (USL), la media y la desviación estándar.

$$Cp = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1)$$

$$Cpkl = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \quad (2a)$$

$$Cpku = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \quad (2b)$$

Existen evidencias de distintos enfoques abordados para los índices de capacidad de proceso tales como: gráficos para análisis y comparativo de $Cpkl$, $Cpku$ y Cp (Singhal, 1991), pruebas de hipótesis para selección de proveedores (Chou, 1994), gráfico para el índice de capacidad y comparación de precios (CPC) para la selección de proveedores (Linn et al., 2006), integración difusa de múltiples criterios y atributos (Shen & Yu, 2012), simulación con datos auto correlacionados (Lundkvist et al., 2012), capacidad de proceso multivariable (Bera & Mukherjee, 2013), decisiones para la selección de proveedores en función a la dominancia estocástica (Shu & Wu, 2014), análisis de empresas manufactureras para gestión de relaciones con proveedores (Tang & Rai, 2012; 2014).

Tiempo de Entrega y Nivel de Servicio

La reducción de la variabilidad y la sincronización de los negocios son reconocidas como elementos claves para lograr entregas oportunas de pedidos de materia prima y productos en las cadenas de suministro. La evaluación del rendimiento de la entrega es un componente crucial en la gestión y control del tiempo total de una cadena de suministro; para ello se han hecho investigaciones en donde se integra una ventana de tiempo de entrega y gráficas para evaluar el comportamiento de las entregas, las cuales integran índices de

capacidad de proceso como elementos en la toma de decisiones al momento de la compra (Hsu et al., 2013). Existen investigaciones en donde se proponen mecanismos de seguridad de alerta temprana dinámica para la calidad de la cadena en donde operan en función de la perturbación del tiempo de espera (Fang & Xiao, 2014).

Tasa de Interés (Interbancaria de Equilibrio -TIIE)

Para el problema que estamos considerando, se inicia de una cotización objetivo de la materia prima y los productos a través de la cadena de suministro. Cuando la capacidad de los proveedores que suministran a este precio o uno menor es completamente utilizada, se hace necesario realizar el abastecimiento a un costo mayor, que debe ser financiado a través de un préstamo. Las condiciones de estos préstamos pueden ser variables de acuerdo a la fuente del dinero, por ello es necesario considerar una referencia para el cálculo de la cantidad a pagar sobre el capital. La referencia que consideramos en este trabajo es la tasa de interés interbancaria de equilibrio (TIIE).

Con el objeto de establecer una tasa de interés interbancaria que refleje mejor las condiciones del mercado de capital, el Banco de México decidió dar a conocer la TIIE en el cual se estableció un procedimiento conforme al cual, el propio Banco con cotizaciones presentadas por las instituciones de crédito, determinará dicha tasa de interés interbancaria de equilibrio; el procedimiento requiere de cotizaciones de cuando menos seis instituciones. De no reunirse el número de cotizaciones antes señalado, el Banco de México determinará la tasa de interés interbancaria de equilibrio de que se trate, tomando en cuenta las condiciones prevalecientes en el mercado de dinero (Diario Oficial de la Federación de México, 1995). La TIIE es calculada diariamente, para plazos de 28, 91 y 182 días, por el Banco de México, con base en cotizaciones presentadas por las instituciones bancarias mediante un mecanismo diseñado para reflejar las condiciones del mercado de dinero en moneda nacional (Diario Oficial de la Federación de México, 1995; Hernández, 2010; Solorza, 2015; León & Alvarado, 2015; Banco de México, 2016).

Ron (2003) presenta una discusión sobre la eficiencia con la que las tasas de interés de depósito son ajustadas a los movimientos de la tasa de interés interbancaria, la cual a su vez recibe influencia de las acciones en la política monetaria del banco central. En otras

publicaciones Bellido (2011) propone un modelo basado en un sistema de metas explícitas de inflación, con la tasa de interés interbancaria como instrumento de política y la cantidad de dinero endógena; mientras que la política fiscal opera con un límite en el déficit fiscal como porcentaje del PIB, y el gasto público es endógeno. La TIIE es una tasa representativa de las operaciones de crédito entre bancos, y sirve de referencia para préstamos a las personas y entre los particulares.

Método

Descripción del problema

Para la investigación existen los siguientes supuestos:

- 1) El uso de los datos para calcular las capacidades de proceso son considerados bajo condiciones de proceso estable y bajo control estadístico.
- 2) Los procesos tienen un comportamiento de distribución normal y la calidad individual es independiente una de la otra.
- 3) Las tolerancias para el tiempo de entrega de materia prima o productos definida por el cliente se llama ventana de tiempo de entrega.
- 4) Las tasas TIIE son tomadas en función a históricos publicados del 2009 al 2015 por el Banco de México.

En esta sección se incluye una declaración del problema, índices y parámetros, y la formulación y descripción del modelo matemático.

El costo total de la calidad está ilustrado como *CTC* integrado por la suma de los costos de la calidad de cada uno de los eslabones *RRTR*, *RRTF* y *RRTD* para proveedores, fabricantes y centros de distribución respectivamente. A continuación se ilustra el cálculo del costo de calidad para el caso de los proveedores que abastecen el material a los fabricantes, denominado como *RRTR*. Este mismo cálculo se realizará para los demás eslabones *RRTF* y *RRTD*.

Se procede a calcular el índice de capacidad de proceso superior C_{pku} y el índice de capacidad de proceso inferior C_{pkl} de la calidad para ambos extremos de la curva, esto para cada uno de los materiales y productos que abastecen cada uno de los proveedores, los

fabricantes y los centros de distribución. La Ec. (3) representa el C_p para el material m enviado por el proveedor r al fabricante f ; este cálculo se hace tomando la media, el límite inferior de especificación y la desviación estándar. La Ec. (4a) representa el C_{pk} inferior para el material m enviado por el proveedor r al fabricante f ; este cálculo se hace tomando la media, el límite inferior de especificación y la desviación estándar. La Ec. (4b) representa el C_{pk} superior para el material m enviado por el proveedor r al fabricante f ; este cálculo se hace tomando el límite superior de especificación, la media y la desviación estándar.

$$C_{pCR_{mrf}} = \frac{USL_{mrf} - LSL_{mrf}}{6\sigma_{mrf}} \quad (3)$$

$$C_{pkICR_{mrf}} = \frac{\mu_{mrf} - LSL_{mrf}}{3\sigma_{mrf}} \quad (4a)$$

$$C_{pkuCR_{mrf}} = \frac{USL_{mrf} - \mu_{mrf}}{3\sigma_{mrf}} \quad (4b)$$

Los C_{pk} 's calculados se utilizarán para determinar el porcentaje de material o producto no conforme que no cumple con los límites de calidad establecidos (Ec. 5). Esto se hará por medio de la utilización de la función de densidad resultante para cada concepto, cuyo resultado será el porcentaje de producto que no cumple especificaciones (%NC), tomando en cuenta los límites de especificación inferior y límite de especificación superior del cliente (LSL y USL) (Pearn & Kotz, 2006).

$$\%NC = 1 - \Phi\left(\frac{USL - \mu}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{\mu - LSL}{\sigma}\right) \quad (5)$$

Una vez obtenido el porcentaje de los productos no conformes que no cumplen especificaciones, se procede a hacer una clasificación de los mismos en dos tipos: los reprocesos y los retrabajos (Hejazi et al., 2008). Esto será usado para calcular el costo de la calidad tomando en cuenta el costo de reproceso y el costo de retrabajo, así como la tasa de reproceso y la tasa de retrabajo para cada eslabón.

- Los reprocesos consisten en: el tratamiento de un lote o sub-lote de materiales de calidad inaceptable repitiendo los mismos pasos del proceso de una etapa definida de la producción de manera que su calidad se puede hacer aceptable, esto es, la repetición

de uno o más pasos de un proceso durante la fabricación después de que se sabe que el producto no se ha cumplido con los límites preestablecidos.

- Los retrabajos consisten en: el tratamiento de un lote o sub-lote de materiales de calidad inaceptable mediante un proceso distinto al utilizado para producir el material de manera original para lograr con esto que su calidad sea aceptable (The European Chemical Industry Council, 1996; Diario Oficial de la Federación de México, 1998), tal como se muestra en la Fig. 2.

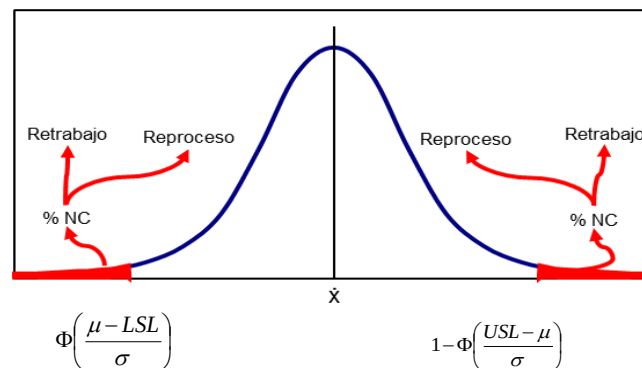


Fig. 2 Porcentaje de Producto No Conforme de Reprocesos y Retrabajos.

Para el caso del cálculo del costo ocasionado por el tiempo de entrega se considera un enfoque similar al de calidad. Se calculan los índices de capacidad en función al tiempo de entrega máximo y mínimo permisible, los cuales actúan como límites de especificación (Linn, 2006). La media y desviación estándar son obtenidas de las entregas históricas del proveedor según cada eslabón de la cadena de suministro. Estos cálculos se basan en el concepto de ventana de tiempo de entrega propuesta por Hsu et al. (2013), tal y como se muestra en la Fig. 3.

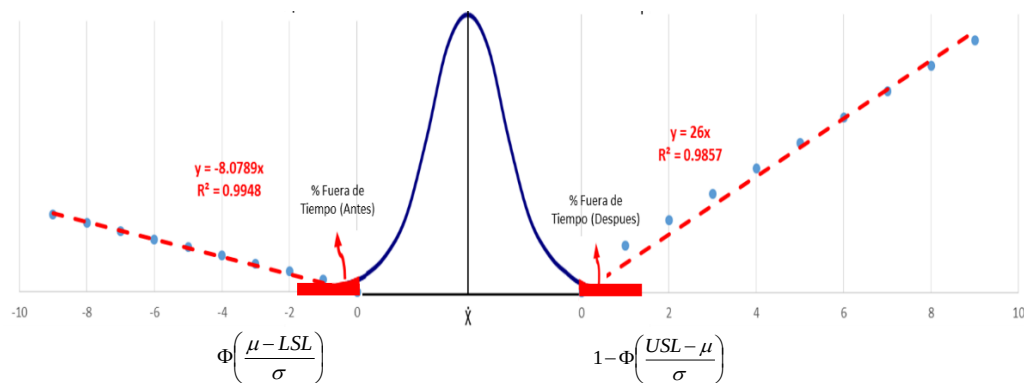


Fig. 3 Costo del tiempo de entrega en la ventana de tiempo de entrega

Una vez obtenidos los índices de capacidad para el tiempo de entrega, se procede a calcular el porcentaje de producto que no cumple con la especificación, ya sea por ser entregado después del tiempo solicitado o por ser entregado antes del tiempo solicitado. Lo anterior será usado para ajustarse a una regresión lineal simple para cada extremo según los días de desfase que tengan con respecto al tiempo objetivo.

El costo del financiamiento se integra en la cadena en base al precio del fabricante y del centro de distribución. Se considera la diferencia de los precios reales y el precio objetivo de los materiales o productos según sea el caso del eslabón a que se refiere, y esta diferencia será multiplicada por la cantidad enviada y por la tasa TIIE.

Una vez calculados los costos de la calidad, tiempo de entrega y financiamiento, se procede a integrar los otros costos al modelo, formados por los costos de operar y colocar el producto en las distintas instalaciones, que se integran por: costos de comprar material, el costo de producir, costo de transporte y el costo de operar (Kumar et al., 2010; Das, 2011; Madadi, 2014).

Modelación Matemática

Índices, Parámetros y Variables de Decisión

Índices:

- m material
- p producto
- r proveedor
- f fabricante
- d centro de distribución
- c cliente

Parámetros:

Calidad

$RRTR_{mrf}$ Costo total de calidad de material m enviado del proveedor r al fabricante f

$RRTF_{pfd}$	Costo total de calidad de producto p enviado del fabricante f a centro de distribución d
$RRTD_{pdc}$	Costo total de calidad de producto p enviado del centro de distribución d al cliente c
$CpCR_{mrf}$	Valor obtenido de calidad de Cp para cada proveedor r
$CpCF_{pfd}$	Valor obtenido de calidad de Cp para cada fabricante f
$CpCD_{pdc}$	Valor obtenido de calidad de Cp para cada de distribución d
$CpkCR_{mrf}$	Valor obtenido de calidad de Cpk para cada proveedor r
$CpkCF_{pfd}$	Valor obtenido de calidad de Cpk para cada fabricante f
$CpkCD_{pdc}$	Valor obtenido de calidad de Cpk para cada de distribución d
$CpkuCR_{mrf}$	Valor obtenido de calidad de Cpk superior para cada proveedor r
$CpkuCF_{pfd}$	Valor obtenido de calidad de Cpk superior para cada fabricante f
$CpkuCD_{pdc}$	Valor obtenido de calidad de Cpk superior para cada de distribución d
$CpklCR_{mrf}$	Valor obtenido de calidad de Cpk inferior para cada proveedor r
$CpklCF_{pfd}$	Valor obtenido de calidad de Cpk inferior para cada fabricante f
$CpklCD_{pdc}$	Valor obtenido de calidad de Cpk inferior para cada de distribución d
RR_{mrf}	Costo de reproceso del material m del proveedor r al fabricante f
RTR_{mrf}	Costo de retrabajo del material m del proveedor r al fabricante f
$TRPR_{mrf}$	Tasa de reproceso del material m del proveedor r al fabricante f
$TRTR_{mrf}$	Tasa de retrabajo del material m del proveedor r al fabricante f
RF_{pfd}	Costo de reproceso del producto p del fabricante f a centro de distribución d
RTF_{pfd}	Costo de retrabajo del producto p del fabricante f a centro de distribución d
$TRPF_{pfd}$	Tasa de reproceso del producto p del fabricante f a centro de distribución d
$TRTF_{pfd}$	Tasa de retrabajo del producto p del fabricante f a centro de distribución d
RD_{pdc}	Costo de reproceso del producto p del centro de distribución d al cliente c
RTD_{pdc}	Costo de retrabajo del producto p del centro de distribución d al cliente c
$TRPD_{pdc}$	Tasa de reproceso del producto p del centro de distribución d al cliente c
$TRTD_{pdc}$	Tasa de retrabajo del producto p del centro de distribución d al cliente c
ΦR_{mrf}	Densidad de la distribución de la característica de calidad del material m del proveedor r al fabricante f

ΦF_{pfd}	Densidad de la distribución de la característica de calidad del producto p del centro de fabricante f al centro de distribución d
ΦD_{pdc}	Densidad de la distribución de la característica de calidad del producto p del centro de distribución d al cliente c

Tiempo de Entrega

$CTER_{mrf}$	Costo total por tiempo de entrega fuera de tiempo de material m enviado del proveedor r al fabricante f
$CTEF_{pfd}$	Costo total por tiempo de entrega fuera de tiempo de producto p enviado del fabricante f al centro de distribución d
$CTED_{pdc}$	Costo total por tiempo de entrega fuera de tiempo de producto p enviado del centro de distribución d al cliente c
$TRUSL_{mrf}$	Límite de tiempo de entrega más tarde del material m entregado por el proveedor r para el fabricante f
$TRL SL_{mrf}$	Límite de tiempo de entrega más temprano del material m entregado por el proveedor r para el fabricante f
$TFUSL_{pfd}$	Límite de tiempo de entrega más tarde del producto p entregado por el fabricante f para el centro de distribución d
$TFL SL_{prd}$	Límite de tiempo de entrega más temprano del producto p entregado por el fabricante f para el centro de distribución d
$TDUSL_{pdc}$	Límite de tiempo de entrega más tarde del producto p entregado por el centro de distribución d para el cliente c
$TDL SL_{pdc}$	Límite de tiempo de entrega más temprano del producto p entregado por el centro de distribución d para el cliente c
$TR\mu_{mrf}$	Media del tiempo de entrega de material m enviado del proveedor r al fabricante f
$TR\sigma_{mrf}$	Desviación estándar del tiempo de entrega material m enviado del proveedor r al fabricante f
$TF\mu_{pfd}$	Media del tiempo de entrega de producto p enviado del fabricante f al centro de distribución d

$TF\sigma_{pfd}$	Desviación estándar del tiempo de entrega producto p enviado del fabricante f a centro de distribución d
$TD\mu_{pdc}$	Media del tiempo de entrega de producto p enviado del centro de distribución d al cliente c
$TD\sigma_{pdc}$	Desviación estándar del tiempo de entrega producto p enviado del centro de distribución d al cliente c
$PDTR_{mrf}$	Constante de la pendiente de la ecuación del costo de entregar después del tiempo límite para el material m del proveedor r al fabricante f
$DDTR_{mrf}$	Cantidad de días de entrega después de tiempo el material m del proveedor r al fabricante f
$PATR_{mrf}$	Constante de la pendiente de la ecuación del costo por día de entregar antes del tiempo límite para el material m del proveedor r al fabricante f
$DATR_{mrf}$	Cantidad de días de entrega antes de tiempo el material m del proveedor r al fabricante f
$PDTF_{pfd}$	Constante de la pendiente de la ecuación del costo de entregar después del tiempo límite para el producto p del fabricante f al centro de distribución d
$DDTF_{pfd}$	Cantidad de días de entrega después de tiempo el producto p del fabricante f al centro de distribución d
$PATF_{pfd}$	Constante de la pendiente de la ecuación del costo de entregar antes del tiempo límite para el producto p del fabricante f al centro de distribución d
$DATF_{pfd}$	Cantidad de días de entrega antes de tiempo el producto p del fabricante f al centro de distribución d
$PDTD_{pdc}$	Constante de la pendiente de la ecuación del costo de entregar después del tiempo límite para el producto p del centro de distribución d al cliente c
$DDTD_{pdc}$	Cantidad de días de entrega después de tiempo el producto p del centro de distribución d al cliente c
$PATD_{pdc}$	Constante de la pendiente de la ecuación del costo de entregar antes del tiempo límite para el producto p del centro de distribución d al cliente c
$DATD_{pdc}$	Cantidad de días de entrega antes de tiempo el producto p del centro de distribución d al cliente c

$TMDER_{mrf}$	Tasa de cantidad entregada después de tiempo del material m del proveedor r al fabricante f
$TMAER_{mrf}$	Tasa de cantidad entregada antes de tiempo del material m del proveedor r al fabricante f
$TPDEF_{pfd}$	Tasa de cantidad entregada después de tiempo del producto p del fabricante f a centro de distribución d
$TPAEF_{pfd}$	Tasa de cantidad entregada antes de tiempo producto p del fabricante f a centro de distribución d
$TPDED_{pdc}$	Tasa de cantidad entregada después de tiempo de tiempo del producto p del centro de distribución d al cliente c
$TPAED_{pdc}$	Tasa de cantidad entregada antes de tiempo del producto p del centro de distribución d al cliente c
ΦTER_{mrf}	Densidad de la distribución de tiempo de entrega del material m del proveedor r al fabricante f
ΦTEF_{pfd}	Densidad de la distribución de tiempo de entrega del producto p del centro de fabricante f al centro de distribución d
ΦTED_{pdc}	Densidad de la distribución de tiempo de entrega del producto p del centro de distribución d al cliente c

Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio (TIIE)

CPR_{mrf}	Costo de financiamiento por precio superior al precio objetivo del material m enviado del proveedor r al fabricante f
CPF_{pfd}	Costo de financiamiento por precio superior al precio objetivo del producto p enviado del fabricante f a centro de distribución d
PR_{mr}	Precio real del material m del proveedor r
PF_{pf}	Precio real del producto p del fabricante f
PD_{pd}	Precio real del producto p del fabricante d
TR_{mr}	Precio objetivo del material m del proveedor r
TF_{pf}	Precio objetivo del producto p del fabricante f
FRF_f	Tasa de interés interbancaria de equilibrio para el fabricante f
FRD_d	Tasa de interés interbancaria de equilibrio para el centro de distribución d

DY_r	Costo de iniciar operaciones con el proveedor r
FF_f	Costo de iniciar operaciones con el fabricante f
DA_d	Costo de iniciar operaciones del centro de distribución d
DOA_f	Capacidad de producir del producto p por el fabricante f
DOV_d	Capacidad de entregar del producto p por el centro de distribución d
DEM_{pc}	Cantidad solicitada de producto p por el cliente c
BV_{mr}	Capacidad de producir del material m por el proveedor r
MT_{mrf}	Costo por unidad de enviar material m del proveedor r al fabricante f
AB_{pfd}	Costo por unidad de enviar producto p del fabricante f al centro de distribución d
YM_{pdc}	Costo por unidad de enviar producto p del centro de distribución d al cliente c
PO_{mp}	Cantidad de material m para producir producto p
FAP_f	Costo por unidad de producir producto p elaborado por el fabricante f
$COSTOMP1_{mrf}$	Costo total de comprar material m al proveedor r por el fabricante f
$YPROV_r$	Variable Binaria de “1”, iniciar operaciones o “0” no iniciar operaciones para el proveedor r
$YFABR_f$	Variable Binaria de valor “1”, iniciar operaciones o de valor “0” no iniciar operaciones para el fabricante f
YCD_d	Variable Binaria de valor “1”, iniciar operaciones o de valor “0” no iniciar operaciones para el centro de distribución d

Variables de Decisión

QR_{mrf}	Cantidad de material m del proveedor r al fabricante f
QF_{pfd}	Cantidad de producto p del fabricante f al centro de distribución d
QD_{pdc}	Cantidad de producto p del centro de distribución d al cliente c
$VOLMP_{mf}$	Volumen recibido de material m para el fabricante f
$VOLFAB_{pf}$	Volumen transformado de cada de producto p del fabricante f

Modelación de Costos

Se calcula el costo de la calidad tomando en cuenta el costo de reproceso RR y el costo de retrabajo RTR así como la tasa de reproceso $TRPR$ y la tasa de retrabajo $TRTR$ para

cada eslabón, la Ec. (6) demuestra los cálculos que se realizarán de retrabajo, en donde m representa la materia prima, r representa el proveedor y f representa el fabricante. Aquí, la cantidad de material m del proveedor r es multiplicada por el porcentaje de producto p por debajo de la especificación y la cantidad de producto p que está por encima de la especificación, que a su vez son multiplicados por el costo y la tasa de retrabajo más el costo y la tasa de reproceso.

$$RRTR = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \left\{ QR_{mrf} \cdot \left[\left(\Phi R_{mrf} \right) \cdot \left(-3CpklCR_{mrf} \right) + \left(\Phi R_{mrf} \right) \cdot \left(-3(2CpCR_{mrf} - CpkuCR_{mrf}) \right) \right] \cdot \right. \\ \left. \left(RR_{mrf} \cdot TRPR_{mrf} + RTR_{mrf} \cdot TRTR_{mrf} \right) \right\} \quad (6)$$

En la Ec. (7) se puede observar el cálculo para el costo ocasionado por el tiempo de entrega, representa el costo del tiempo de entrega, el cual es afectado según los días de desfase que tengan con respecto al tiempo objetivo, así como la cantidad que fue entregada fuera de tiempo y el costo por día entregado fuera de tiempo, en donde QR_{mrf} representa la cantidad a enviar de material m por el proveedor r al fabricante f el cual se identifica como $TMAER_{mrf}$, esto es multiplicado por la tasa de cantidad entregada antes de tiempo del material m del proveedor r al fabricante f , esto se multiplica por el porcentaje entregado antes tiempo del material m entregado por el proveedor r para el fabricante f el cual se calcula como sigue, para finalmente ser multiplicado por el resultado de la multiplicación de la constante de la Pendiente de la ecuación del costo por día de entregar antes del tiempo límite para el material m del proveedor r al fabricante f el cual se identifica como $(PATR_{mrf})$ por la cantidad de días de entrega antes de tiempo el material m del proveedor r al fabricante f el cual se identifica como $(DATR_{mrf})$.

$$\left\{ \left(QR_{mrf} \cdot TMAER_{mrf} \right) \left[\Phi \left(\frac{TR\mu_{mrf} - TRLSL_{mrf}}{TR\sigma_{mrf}} \right) \right] \right\} \left(PATR_{mrf} \cdot DATR_{mrf} \right) \quad (7)$$

El costo de la TIIE (CTP) se integra en el modelo representado en la Ec. (8) la cual muestra el costo total de financiamiento en la cadena, siendo este considerado en base al costo del fabricante (CPR_{mrf}) y del centro de distribución (CPF_{pfd}). La Ec. (9), muestra el cálculo para cada eslabón por medio de la multiplicación solo aquel que resulte de la diferencia de los precios reales ($-PR_{mr}$) y precio objetivo (TR_{mr}) de los materiales o productos

según sea el caso del eslabón que se refiera que excede al precio objetivo para lo cual se calculará la diferencia del precio real en relación al precio objetivo y esta diferencia será multiplicada la cantidad enviada (QR_{mrf}) y por la tasa TIIE asignada, esto se comprobará en tres escenarios (tasa baja, tasa media y tasa alta), para determinar el costo de la tasa de financiamiento (FRF_f), se hace en función el valor del TIIE calculado en baso a los últimos 5 años históricos registrados por la institución financiera aplicable al país.

$$CTP = CPR_{mrf} + CPF_{pfd} \quad (8)$$

$$CPR_{mrf} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \left\{ \max[0, (-PR_{mr} + TR_{mr})] \cdot QR_{mrf} \cdot FRF_f \right\} \quad (9)$$

El costo de comprar material es obtenido por medio de la cantidad a comprar por el precio real ($COSTOMP$) expresado en la Ec. (10). El costo de producir ($PRODUCIR$) en la Ec. (11) es calculada para cada producto p de cada fabricante f multiplicando el costo de fabricar por el volumen fabricado. El costo de transporte ($TRANSPORTE$) en la Ec. (12) es el costo de enviar el material o producto a su destino solicitado a lo largo de cada uno de los eslabones que conforman la cadena de suministro. El costo de operar ($COSTO OPERAR$) en la Ec. (13) de cada uno de los eslabones que conforman la cadena de suministro está representado por la multiplicación del costo de operar y su variable binaria.

$$COSTOMP_{mrf} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R (QR_{mrf} \cdot PR_{mr}) \quad (10)$$

$$PRODUCIR = \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F (FA_{pf} \cdot VOLFAB_{pf}) \quad (11)$$

$$TRANSPORTE = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F (MT_{mrf} \cdot QR_{mrf}) + \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F \sum_{d=1}^D (AB_{pfd} \cdot QF_{pfd}) + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C (YM_{pdc} \cdot QD_{pdc}) \quad (12)$$

$$COSTOOPERAR = \sum_{r=1}^R (DY_r \cdot YPROV_r) + \sum_{f=1}^F (FF_f \cdot YFABR_f) + \sum_{d=1}^D (DA_d \cdot YCD_d) \quad (13)$$

Programa Lineal Entero Mixto

$$\text{Función Objetivo: Maximizar Utilidad} \quad (14)$$

$$Utilidad = Ganancias - Gastos \quad (15a)$$

$$Ganancias = \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D (QD_{pdc} \cdot PD_{pd}) \quad (15b)$$

$$Gastos = CTC + CTT + CTP + COSOTOMP1 + PRODUCIR + TRANSPORTE + COSTO OPERAR \quad (15c)$$

$$CTC = RRTR_{mrf} + RRTF_{pfd} + RRTD_{pdc} \quad (16)$$

$$CpCR_{mrf} = \frac{USL_{mrf} - LSL_{mrf}}{6\sigma_{mrf}} \quad (17)$$

$$CpkuCR_{mrf} = \frac{USL_{mrf} - \mu_{mrf}}{3\sigma_{mrf}} \quad (18)$$

$$CpklCR_{mrf} = \frac{\mu_{mrf} - LSL_{mrf}}{3\sigma_{mrf}} \quad (19)$$

$$CpkCR_{mrf} = \min \{CpkuCR_{mrf}, CpklCR_{mrf}\} \quad (20)$$

$$RRTR_{mrf} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \left\{ QR_{mrf} \cdot \left[\left(\Phi R_{mrf} \left(-3CpklCR_{mrf} \right) \right) + \left(\Phi R_{mrf} \left(-3 \left(2CpCR_{mrf} - CpkuCR_{mrf} \right) \right) \right) \right] \right\} \quad (21)$$

$$CpCF_{pfd} = \frac{USL_{pfd} - LSL_{pfd}}{6\sigma_{pfd}} \quad (22)$$

$$CpkuCF_{pfd} = \frac{USL_{pfd} - \mu_{pfd}}{3\sigma_{pfd}} \quad (23)$$

$$CpklCF_{pfd} = \frac{\mu_{pfd} - LSL_{pfd}}{3\sigma_{pfd}} \quad (24)$$

$$CpkCF_{pfd} = \min \{CpkuCF_{pfd}, CpklCF_{pfd}\} \quad (25)$$

$$RRTF_{pfd} = \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F \sum_{d=1}^D \left\{ QF_{pfd} \cdot \left[\left(\Phi F_{pfd} \left(-3CpklCF_{pfd} \right) \right) + \left(\Phi F_{pfd} \left(-3 \left(2CpCF_{pfd} - CpkuCF_{pfd} \right) \right) \right) \right] \right\} \quad (26)$$

$$CpCD_{pdc} = \frac{USL_{pdc} - LSL_{pdc}}{6\sigma_{pdc}} \quad (27)$$

$$CpkuCD_{pdc} = \frac{USL_{pdc} - \mu_{pdc}}{3\sigma_{pdc}} \quad (28)$$

$$CpklCD_{pdc} = \frac{\mu_{pdc} - LSL_{pdc}}{3\sigma_{pdc}} \quad (29)$$

$$CpkCD_{pdc} = \min\{CpkuCR_{pdc}, CpklCR_{pdc}\} \quad (30)$$

$$RRTD_{pdc} = \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \left\{ QD_{pdc} \cdot \left[\left(\Phi D_{pdc} (-3CpklCD_{pdc}) \right) + \left(\Phi D_{pdc} (-3(2CpCD_{pdc} - CpkuCD_{pdc})) \right) \right] \right\} \\ \left[(RD_{pdc} \cdot TRPD_{pdc}) + (RTD_{pdc} \cdot TRTD_{pdc}) \right] \quad (31)$$

$$CTC = RRTR_{mrf} + RRTF_{pfd} + RRTD_{pdc} \quad (32)$$

$$CTER_{mrf} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \left\{ \left[\left(QR_{mrf} \cdot TM DER_{mrf} \right) \left(1 - \Phi TER_{mrf} \left(\frac{TRUSL_{mrf} - TR\mu_{mrf}}{TR\sigma_{mrf}} \right) \right) \right] (PDTR_{mrf} \cdot DDTR_{mrf}) \right] \\ + \left[\left(QR_{mrf} \cdot TMAR_{mrf} \right) \left(\Phi TER_{mrf} \left(\frac{TR\mu_{mrf} - TRLSL_{mrf}}{TR\sigma_{mrf}} \right) \right) \right] (PATR_{mrf} \cdot DATR_{mrf}) \right] \quad (33)$$

$$CTEF_{pfd} = \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F \sum_{d=1}^D \left\{ \left[\left(QF_{pfd} \cdot TPDEF_{pfd} \right) \left(1 - \Phi TEF_{pfd} \left(\frac{TFUSL_{pfd} - TF\mu_{pfd}}{TF\sigma_{pfd}} \right) \right) \right] (PDTF_{pfd} \cdot DDTE_{pfd}) \right] \\ + \left[\left(QF_{pfd} \cdot TPAEF_{pfd} \right) \left(\Phi TEF_{pfd} \left(\frac{TF\mu_{pfd} - TFLSL_{pfd}}{TF\sigma_{pfd}} \right) \right) \right] (PATF_{pfd} \cdot DATF_{pfd}) \right] \quad (34)$$

$$CTED_{pdc} = \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \left\{ \left[\left(QD_{pdc} \cdot TPDED_{pdc} \right) \left(1 - \Phi TED_{pdc} \left(\frac{TDUSL_{pdc} - TD\mu_{pdc}}{TD\sigma_{pdc}} \right) \right) \right] (PD TD_{pdc} \cdot DD TD_{pdc}) \right] \\ + \left[\left(QD_{pdc} \cdot TPAED_{pdc} \right) \left(\Phi TED_{pdc} \left(\frac{TD\mu_{pdc} - TDL SL_{pdc}}{TD\sigma_{pdc}} \right) \right) \right] (PATD_{pdc} \cdot DATD_{pdc}) \right] \quad (35)$$

$$CTP = CPR_{mrf} + CPF_{pfd} \quad (36)$$

$$CPR_{mrf} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \left\{ \max[0, (-PR_{mr} + TR_{mr}) \cdot QR_{mrf} \cdot FRF_f] \right\} \quad (37)$$

$$CPF_{pfd} = \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F \sum_{d=1}^D \left\{ \max \left[0, \left(-PF_{pf} + TF_{pf} \right) \cdot QF_{pfd} \cdot FRD_d \right] \right\} \quad (38)$$

$$COSTOMPI_{mrf} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \left(QR_{mrf} \cdot PR_{mr} \right) \quad (39)$$

$$PRODUCIR = \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F \left(FA_{pf} \cdot VOLFAB_{pf} \right) \quad (40)$$

$$TRANSPORTE = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \left(MT_{mrf} \cdot QR_{mrf} \right) + \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F \sum_{d=1}^D \left(AB_{pfd} \cdot QF_{pfd} \right) + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \left(YM_{pdc} \cdot QD_{pdc} \right) \quad (41)$$

$$COSTOOPERAR = \sum_{r=1}^R \left(DY_r \cdot YPROV_r \right) + \sum_{f=1}^F \left(FF_f \cdot YFABR_f \right) + \sum_{d=1}^D \left(DA_d \cdot YCD_d \right) \quad (42)$$

S.a.

$$\sum_{d=1}^D QD_{pdc} \geq DEM_{pc} \quad \forall p, c \quad (43)$$

$$\sum_{d=1}^D QF_{pfd} \leq VOLFAB_{pf} \quad \forall p, f \quad (44)$$

$$\sum_{p=1}^P VOLFAB_{pf} \leq DOA_f \cdot YFABR_f \quad \forall f \quad (45)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C QD_{pdc} \leq DOV_d \cdot YCD_d \quad \forall d \quad (46)$$

$$\sum_{p=1}^P VOLFAB_{fp} \cdot PO_{mp} \leq \sum_{r=1}^R QR_{mrf} \quad \forall m, f \quad (47)$$

$$VOLMP_{mf} = \sum_{p=1}^P VOLFAB_{fp} \cdot PO_{mp} \quad \forall m, f \quad (48)$$

$$VOLMP_{mf} = \sum_{r=1}^R QR_{mrf} \quad \forall m, f \quad (49)$$

$$\sum_{f=1}^F QR_{mrf} \leq BV_{mr} \cdot YPROV_r \quad \forall m, r \quad (50)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F QF_{pfd} \leq DOV_d \cdot YCD_d \quad \forall d \quad (51)$$

$$\sum_{f=1}^F QF_{pfd} = \sum_{c=1}^C QD_{pdc} \quad \forall p, d \quad (52)$$

El objetivo es maximizar la Utilidad Ec. (14), los Ganancias Ec. (14a) es obtenida por medio de la multiplicación de la cantidad de producto vendido (QD_{pdc}) por el precio real del producto (PD_{pd}), los Gastos está definida en la Ec. (15) los cuales están integrados por la suma de los costos totales de CTC , CTT , $COSTOMP1$, $PRODUCIR$, $TRANSPORTE$ y $COSTO OPERAR$, el costo total de la calidad (CTC) está definido en la Ec. (16) y está comprendido por la suma de los costos de calidad (reprocesos y retrabajos) de ($RRTR_{mrf}$), ($RRTF_{pfd}$) y ($RRTD_{pdc}$), la Ec. (17) determina el índice de capacidad de proceso (Cp) para cada proveedor, Ec. (18) calcula el ($Cpku$) superior del material del proveedor, Ec. (19) calcula el ($Cpkl$) inferior del material del proveedor, la Ec. (20) determina el índice de capacidad real de proceso (Cpk) para cada proveedor, la Ec. (21) está compuesta por el costo total de reprocesos y retrabajos de cada materia prima m que cada proveedor r abastece a cada fabricante f ($RRTR_{mrf}$), la Ec. (22) determina el índice de capacidad de proceso (Cp) para cada fabricante, Ec. (23) calcula el ($Cpku$) superior del producto del fabricante, Ec. (24) calcula el ($Cpkl$) inferior del producto del fabricante, la Ec. (25) determina el índice de capacidad real de proceso (Cpk) para cada fabricante, la Ec. (26) está compuesta por el costo total de reprocesos y retrabajos de cada producto p que cada fabricante f abastece a cada centro de distribución d ($RRTF_{pfd}$), la Ec. (27) determina el índice de capacidad de proceso (Cp) para cada centro de distribución, Ec. (28) calcula el ($Cpku$) superior del producto del centro de distribución, Ec. (29) calcula el ($Cpkl$) inferior del producto del centro de distribución, la Ec. (30) determina el índice de capacidad real de proceso (Cpk) para cada centro de distribución, la Ec. (31) está compuesta por el costo total de reprocesos y retrabajos de cada producto p que cada centro de distribución d abastece a cada cliente c ($RRTD_{pdc}$), Ec. (32) define el costo total del tiempo de entrega (CTT) y está comprendido por la suma de los costos de ($CTER_{mrf}$), ($CTEF_{pfd}$) y ($CTED_{pdc}$).

La Ec. (33) está compuesta por el costo total de entregas antes del tiempo permisible solicitado y después del tiempo permisible solicitado de cada materia prima m que cada proveedor r abastece a cada fabricante f ($CTER_{mrf}$) tomando en cuenta la cantidad multiplicada por la tasa histórica de entregas después del tiempo solicitado multiplicado por el porcentaje de llegada tarde, la Ec. (34) compuesta por el costo total de entregas antes del tiempo permisible solicitado y después del tiempo permisible solicitado de cada producto p que cada fabricante f abastece a cada centro de distribución d ($CTEF_{pfd}$) tomando en cuenta la cantidad multiplicada por la tasa histórica de entregas después del tiempo solicitado multiplicado por el porcentaje de llegada tarde. La Ec. (35) está compuesta por el costo total de entregas antes del tiempo permisible solicitado y después del tiempo permisible solicitado de cada producto p que cada centro de distribución d abastece a cada cliente c ($CETD_{pdc}$) tomando en cuenta la cantidad multiplicada por la tasa histórica de entregas después del tiempo solicitado multiplicado por el porcentaje de llegada tarde, la Ec. (36) está compuesta por el costo total del financiamiento (CTP) de fabricantes y centros de distribución debido a la diferencia de precios reales vs precios objetivos los cuales integran la suma de los precios de comprar de (CPR_{mrf}), y (CPF_{pfd}) la Ec. (37) está compuesta por el costo de financiamiento (CPR_{mrf}) para cada fabricante f debido a la diferencia del precio real vs el precio objetivo de cada materia prima m que cada proveedor r abastece multiplicado por la cantidad y la tasa del costo de préstamo correspondiente a cada fabricante f por la cantidad solicitada, la Ec. (38) está compuesta por costo de financiamiento (CPF_{pfd}) para cada centro de distribución d debido a la diferencia del precio real vs el precio objetivo de cada producto p que cada fabricante f abastece multiplicado por la cantidad y la tasa del costo de préstamo correspondiente a cada centro de distribución d por la cantidad solicitada, la Ec. (39) define los costos de comprar el material prima m que cada proveedor r ($COSTOMP1$), la Ec. (40) define el costo totales de producir los productos p y del fabricante f ($PRODUCIR$), la Ec. (41) define los costos totales del transporte del proveedor al fabricante, del fabricante al centro de distribución y del centro de distribución al cliente cada material m y de cada producto p ($TRASNPSORTE$) y la Ec. (42) define los costos totales de Costo de operar Proveedor, Fabricante y Centro de Distribución con variables Binaria ($COSTO OPERAR$).

Las restricciones están definidas en las siguientes ecuaciones, Ec. (43) Asegura que se cubra la demanda del cliente, Ec. (44) Asegura que se respete la cantidad embarcada por

fabricante en función del volumen, Ec (45) Define que el volumen sea menor a las fabricas a operar por medio de la restricción binaria de operar fabrica, Ec. (46) Asegura que la cantidad del centro de distribución sea menor a los que se activen por medio una restricción Binaria de operar almacén, Ec. (47) Asegura que la cantidad de Material sea menor a la Capacidad del proveedor, Ec. (48) realiza la conversión de volumen de material a producto, Ec. (49) Asegura que el volumen de material menor a cantidad a enviar por el proveedor, Ec. (50) Asegura que la cantidad de material al fabricante sea menor a la capacidad disponible de cada proveedor, Ec. (51) Variable binaria para asegurar que operar el fabricante en base a capacidad como alta (Inf.), Ec. (52) Asegura que la cantidad enviada del fabricante debe ser igual a la cantidad enviada del centro de distribución al cliente.

Ejemplo numérico

Datos

Está compuesto por cuatro eslabones de 40 proveedores (r) que abastecen 30 materiales (m) a 30 fabricantes (f) y estos a su vez abastecen 20 productos (p) a los 30 centros de distribución (d) que a su vez envía productos (p) a cada uno de los 40 clientes (c) para cumplir con cada una de las demandas de los clientes (DEM_{pc}). En él se hará el comparativo haciendo cambios en la disponibilidad de capacidades, niéveles de calidad, tiempos de entrega y tasa de interés interbancaria de equilibrio cada una de ellas en tres escenarios.

Para los cambios en capacidad se consideraron de la siguiente manera: Capacidad Alta tomando un 55% por encima de la demanda, Capacidad Media tomando un 35% por encima de la demanda y finalmente una Capacidad Baja tomando un 25% por encima de la demanda, esto se hará para cada una de las capacidades de los eslabones de la cadena de suministros los cuales serán proveedores (BV_{mr}), fabricantes (DOA_f) y centros de distribución (DOV_d), debiendo la cadena cubrir con la demanda para cliente de la cadena (DEM_{pc}).

Para el factor calidad se plantearon de tres escenarios diferentes de niveles de calidad esto en función a niveles de desempeño: Calidad Alta, Calidad Media y Calidad Baja, los porcentajes de defectos fueron determinados en función a los riesgos que implica en cada eslabón el generar defectos por la naturaleza de su operación en donde la transformación

genera porcentajes más altos. Así la Calidad Alta considera una tasa de defectos para los proveedores $TDEFPV_{mrf}$ que va desde 0.00 hasta 0.03, para los fabricantes $TDEFF_{pfd}$ que va desde 0.00 hasta 0.05 y para los centros de distribución $TDEFW_{pdc}$ que va desde 0.00 hasta 0.04. La Calidad Media considera una tasa de defectos para los proveedores $TDEFPV_{mrf}$ que va desde 0.04 hasta 0.08, para los fabricantes $TDEFF_{pfd}$ que va desde 0.06 hasta 0.11 y para los centros de distribución $TDEFW_{pdc}$ que va desde 0.05 hasta 0.09. La Calidad Baja considera una tasa de defectos para los proveedores $TDEFPV_{mrf}$ que va desde 0.09 hasta 0.14, para los fabricantes $TDEFF_{pfd}$ que va desde 0.12 hasta 0.20 y para los centros de distribución $TDEFW_{pdc}$ que va desde 0.10 hasta 0.16 como valor mínimo.

Para el concepto de tiempo de entrega se plantearon tres escenarios tomando en cuenta distintas alternativas de transporte quedando de la siguiente manera los tres escenarios de tiempos de entrega (Bajo, Medio y Alto) para cada uno de los eslabones de la cadena de suministro (proveedor, fabricante, centro de distribución y cliente):

1. Tiempo de entrega bajo: estará de la siguiente manera, Si es después de tiempo de la fecha solicitada este estará entre 0-4 días y si es antes de tiempo de la fecha solicitada este estará entre 0-4 días.
2. Tiempo de entrega medio: estará de la siguiente manera, Si es después de tiempo de la fecha solicitada este estará entre 5-15 días y si es antes de tiempo de la fecha solicitada este estará entre 5-15 días.
3. Tiempo de entrega alto: estará de la siguiente manera, Si es después de tiempo de la fecha solicitada este estará entre 16-30 días y si es antes de tiempo de la fecha solicitada este estará entre 16-30 días.

Finalmente para la determinación la TIIE se plantearon tres escenarios tomando en cuenta los valores máximos, medios y mínimos registrados según su periodicidad para plazos 28, 91 y 182 días emitidas por el Banco de México con base en cotizaciones presentadas por las instituciones bancarias, las cuales reflejan las condiciones del mercado de dinero en moneda nacional los tres escenarios calculados de máximo, medio y mínimo fue usado para

cada uno de los dos eslabones de la cadena de suministro en este caso para el fabricante y centro de distribución quedando de la siguiente manera:

1. TIIE baja con un valor de 3.3 por ciento la cual aplicará para aquellos precios por encima de su valor objetivo
2. TIIE media con un valor de 6 por ciento la cual aplicará para aquellos precios por encima de su valor objetivo
3. TIIE alta con un valor de 8.7 por ciento la cual aplicará para aquellos precios por encima de su valor objetivo

Para evaluar el impacto de los distintos niveles de Capacidad, Calidad, Tiempo de Entrega y TIIE, se realizó un diseño de experimentos factorial fraccionado (2^{k-p}) con puntos centrales quedando de la siguiente manera 2^{4-1} en donde se consideraron cada uno de los factores de la siguiente manera Capacidad (Alta, Baja), Calidad (Alta, Baja), Tiempo de Entrega (Alto, Bajo) y TIIE (Alta, Baja) y se incluyeron puntos centrales de cada uno de los conceptos para explorar una posible curvatura en el modelo. El modelo se replicó cinco veces y se incluyeron tres puntos centrales en cada diseño, dando un total de 55 corridas experimentales.

Procedimiento de Solución

El modelo propuesto presentado en la sección 4.3 se solucionó en el ejemplo usando el software GAMS-CPLEX en un procesador Intel Core 3, 3,0 GB de RAM, procesador 2.27 GHZ PC. El problema contiene: 82,068 variables totales, 18,100 binarias. Tomó de 17 a 25 min por corrida dando un total de 982 minutos para obtener una solución óptima global.

Resultados

En la Tabla 1 se pueden observar los resultados promedio de los nueve escenarios del diseño de experimentos factorial fraccionado 2^{4-1} con 5 puntos centrales y con 5 réplicas, en

él se expresan las utilidades calculadas así como los cotos totales y sub costos, en donde se incluyen los costos de Calidad, Tiempo de Entrega, Costos de Materia Prima, Costos de Producción, Costos de Transporte, Costos de Operación y Costo de Financiamiento debido al TIIE, en donde la mayor utilidad se tiene con una capacidad alta con una calidad alta con tiempo de entrega bajo y TIIE bajo.

Tabla 1. Resumen de Costos Variando Capacidades y Calidades

Capacidad	Calidad	Tiempo de Entrega	Financiamiento	Utilidad	Costos Totales	Calidad	Tiempo de Entrega	Materia Prima	Produccion	Transporte	Operacion	Financiamiento
Cap. Baja	Cal. Baja	Tiem. Entr. Bajo	Finan. Bajo	\$1,360,043.06	\$ 2,018,956.94	\$ 647,879.86	\$ 20,584.56	\$201,599.51	\$178,788.40	\$832,004.20	\$ 136,256.00	\$ 1,844.40
Cap. Alta	Cal. Baja	Tiem. Entr. Bajo	Finan. Alto	\$1,339,641.58	\$ 2,039,358.42	\$ 654,540.73	\$ 19,327.68	\$204,765.54	\$181,096.20	\$850,951.80	\$ 126,928.60	\$ 1,747.87
Cap. Baja	Cal. Alta	Tiem. Entr. Bajo	Finan. Alto	\$1,938,024.37	\$ 1,440,975.63	\$ 62,696.05	\$ 16,054.17	\$204,376.27	\$177,191.20	\$842,811.00	\$ 136,191.60	\$ 1,655.34
Cap. Alta	Cal. Alta	Tiem. Entr. Bajo	Finan. Bajo	\$1,968,573.25	\$ 1,410,426.75	\$ 57,216.61	\$ 14,683.14	\$200,467.45	\$175,918.60	\$835,318.00	\$ 125,320.40	\$ 1,502.55
Cap. Baja	Cal. Baja	Tiem. Entr. Alto	Finan. Alto	\$1,056,599.59	\$ 2,322,400.41	\$ 690,396.33	\$264,412.27	\$202,948.60	\$182,851.60	\$840,620.80	\$ 138,975.80	\$ 2,195.02
Cap. Alta	Cal. Baja	Tiem. Entr. Alto	Finan. Bajo	\$1,062,040.54	\$ 2,316,959.46	\$ 699,020.20	\$244,240.99	\$205,726.42	\$184,320.40	\$848,430.20	\$ 133,240.80	\$ 1,980.45
Cap. Baja	Cal. Alta	Tiem. Entr. Alto	Finan. Bajo	\$1,690,604.70	\$ 1,688,395.30	\$ 84,562.67	\$254,161.18	\$200,148.33	\$181,272.20	\$827,294.80	\$ 138,920.20	\$ 2,035.92
Cap. Alta	Cal. Alta	Tiem. Entr. Alto	Finan. Alto	\$1,718,832.69	\$ 1,660,167.31	\$ 81,746.51	\$222,891.04	\$203,940.97	\$181,497.00	\$840,946.40	\$ 127,206.80	\$ 1,938.59
Cap. Media	Calidad Media	Tiem. Entr. Media	Finan. Medio	\$1,509,100.96	\$ 1,869,899.04	\$ 352,695.05	\$154,772.51	\$203,482.32	\$180,978.53	\$840,930.60	\$ 135,125.47	\$ 1,914.56

Los resultados de la relación de los efectos se muestra en la Tabla 2 de Análisis de Varianza para Utilidad de cada escenario, en donde se muestra que existe una diferencia significativa según los distintos niveles de los factores, en especial en las distintos niveles de calidad, con lo cual obtenemos una R^2 Ajustada de 98.3577 por ciento, también podemos ver en la Fig. 4 el Pareto Estandarizado para la utilidad de los factores y en la Fig. 5 la Gráfica de Efectos Principales para Utilidad.

Tabla 2. Análisis de Varianza para Utilidad de cada escenario

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Capacidad	1.19992E9	1	1.19992E9	0.66	0.4193
B:Calidad	3.8991E12	1	3.8991E12	2160.55	0.0000
C:Tiempo de Entrega	7.26578E11	1	7.26578E11	402.61	0.0000
D:Financiamiento	4.95733E8	1	4.95733E8	0.27	0.6029
AB+CD	3.39825E9	1	3.39825E9	1.88	0.1771
AC+BD	3.4579E8	1	3.4579E8	0.19	0.6638
AD+BC	4.39786E9	1	4.39786E9	2.44	0.1258
bloques	1.18858E10	4	2.97146E9	1.65	0.1801
Error total	7.7601E10	43	1.80468E9		
Total (corr.)	4.725E12	54			

R-cuadrada = 98.3577 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 98.113 porciento

Error estándar del est. = 42481.5

Error absoluto medio = 29211.7

Estadístico Durbin-Watson = 1.87756 (P=0.1825)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.0550726

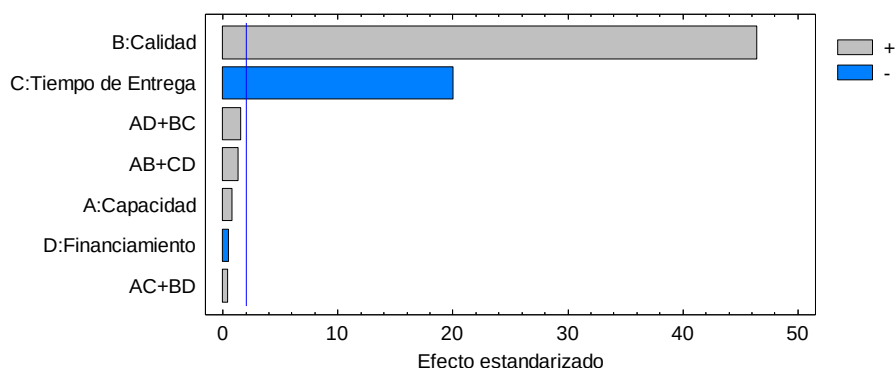


Fig. 4 Pareto Estandarizado para la utilidad de los factores

Se ajusta el modelo en función a su significancia dejando los factores principales del modelo que se muestra en la Tabla 3 de Análisis de Varianza para Utilidad (Modelo Ajustado), en el cual se obtiene una R cuadrada ajustada de 97.817, en la Fig. 5 muestra el Pareto Estandarizado para utilidad de los factores principales.

Tabla 3. Análisis de Varianza para Utilidad (Modelo Ajustado)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
B:Calidad	3.8991E12	1	3.8991E12	2041.32	0.0000
C:Tiempo de Entrega	7.26578E11	1	7.26578E11	380.39	0.0000
Error total	9.93244E10	52	1.91009E9		
Total (corr.)	4.725E12	54			

R-cuadrada = 97.8979 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 97.817 porciento

Error estándar del est. = 43704.5

Error absoluto medio = 35708.6

Estadístico Durbin-Watson = 1.72701 (P=0.1321)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.13133

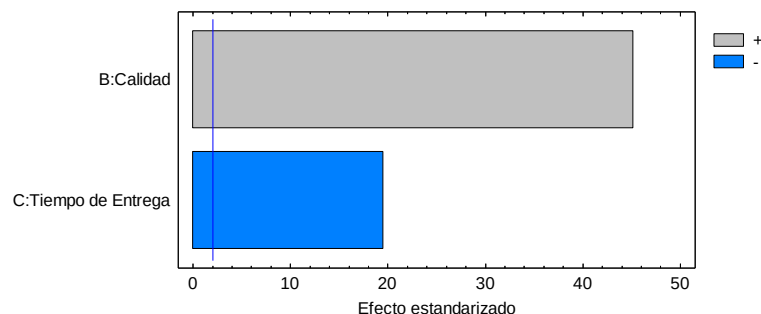


Fig. 5 Grafica de efectos principales para Utilidad

Se procedió a realizar un ANOVA Simple para evaluar la contribución y variabilidad de los cada uno de los costos en cada uno de los escenarios mencionados en el diseño factorial

fraccionado, mismos que se muestran en la Tabla 4. ANOVA para Utilidad por Escenario, en él se puede observar que si existen diferencias significativas para cada uno de los nueve escenarios.

Tabla 4. ANOVA para Utilidad por Escenario

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	4.63616E12	8	5.7952E11	300.06	0.0000
Intra grupos	8.88411E10	46	1.93133E9		
Total (Corr.)	4.725E12	54			

Así en la gráfica de la Fig. 6 de Gráfico de Caja y Bigotes de la utilidad para cada escenario se puede observar que la capacidad alta con la calidad alta es lo más económico, así mismo se observar que la capacidad media con calidad alta es el segundo más económico seguido muy de cerca por capacidad baja con calidad baja, la Fig. 7 muestra el gráfico de medias de cada escenario.

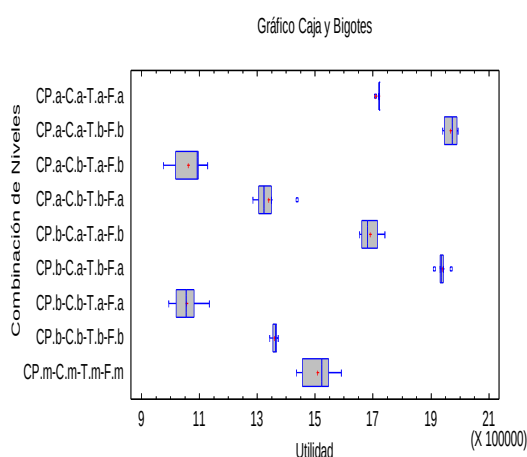


Fig. 6 Gráficos de Cajas y Bigotes de la utilidad

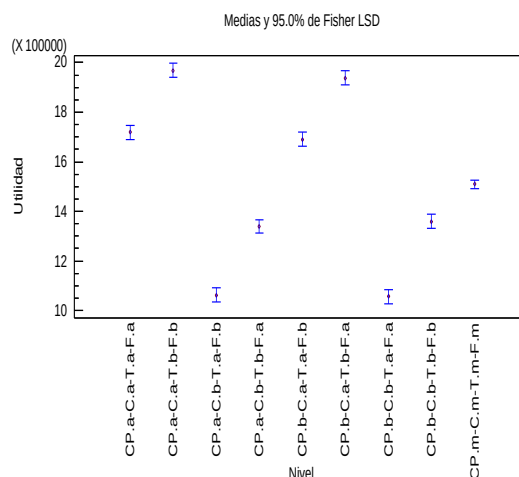


Fig. 7 Gráficos de Medias

Se puede observar que la mayor utilidad se obtiene con la capacidad alta, calidad alta, tiempo de entrega bajo y financiamiento bajo (CP.a-C.a-T.b-F.b) pero con la prueba LSD podemos ver que no existe una diferencia significativa en la utilidad con una capacidad baja, calidad alta, tiempo de entrega bajo y financiamiento alto (CP.b-C.a-T.b-F.a), tal y como se puede observar en la Tabla 5. Pruebas de Múltiple Rangos para Utilidad por Escenario, la Fig. 7 muestra el gráfico de medias de cada escenario.

Tabla 5. Pruebas de Múltiple Rangos para Utilidad por Escenario
Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
CP.b-C.b-T.a-F.a	5	1.0566E6	X
CP.a-C.b-T.a-F.b	5	1.06204E6	X
CP.a-C.b-T.b-F.a	5	1.33964E6	X
CP.b-C.b-T.b-F.b	5	1.36004E6	X
CP.m-C.m-T.m-F.m	15	1.5091E6	X
CP.b-C.a-T.a-F.b	5	1.6906E6	X
CP.a-C.a-T.a-F.a	5	1.71883E6	X
CP.b-C.a-T.b-F.a	5	1.93802E6	X
CP.a-C.a-T.b-F.b	5	1.96857E6	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
CP.a-C.a-T.a-F.a - CP.a-C.a-T.b-F.b	*	-249741.	55947.4
CP.a-C.a-T.a-F.a - CP.a-C.b-T.a-F.b	*	656792.	55947.4
CP.a-C.a-T.a-F.a - CP.a-C.b-T.b-F.a	*	379191.	55947.4
CP.a-C.a-T.a-F.a - CP.b-C.a-T.a-F.b		28228.0	55947.4
CP.a-C.a-T.a-F.a - CP.b-C.a-T.b-F.a	*	-219192.	55947.4
CP.a-C.a-T.a-F.a - CP.b-C.b-T.a-F.a	*	662233.	55947.4
CP.a-C.a-T.a-F.a - CP.b-C.b-T.b-F.b	*	358790.	55947.4
CP.a-C.a-T.a-F.a - CP.m-C.m-T.m-F.m	*	209732.	45680.9
CP.a-C.a-T.b-F.b - CP.a-C.b-T.a-F.b	*	906533.	55947.4
CP.a-C.a-T.b-F.b - CP.a-C.b-T.b-F.a	*	628932.	55947.4
CP.a-C.a-T.b-F.b - CP.b-C.a-T.a-F.b	*	277969.	55947.4
CP.a-C.a-T.b-F.b - CP.b-C.a-T.b-F.a		30548.9	55947.4
CP.a-C.a-T.b-F.b - CP.b-C.b-T.a-F.a	*	911974.	55947.4
CP.a-C.a-T.b-F.b - CP.b-C.b-T.b-F.b	*	608530.	55947.4
CP.a-C.a-T.b-F.b - CP.m-C.m-T.m-F.m	*	459472.	45680.9
CP.a-C.b-T.a-F.b - CP.a-C.b-T.b-F.a	*	-277601.	55947.4
CP.a-C.b-T.a-F.b - CP.b-C.a-T.a-F.b	*	-628564.	55947.4
CP.a-C.b-T.a-F.b - CP.b-C.a-T.b-F.a	*	-875984.	55947.4
CP.a-C.b-T.a-F.b - CP.b-C.b-T.a-F.a		5440.96	55947.4
CP.a-C.b-T.a-F.b - CP.b-C.b-T.b-F.b	*	-298003.	55947.4
CP.a-C.b-T.a-F.b - CP.m-C.m-T.m-F.m	*	-447060.	45680.9
CP.a-C.b-T.b-F.a - CP.b-C.a-T.a-F.b	*	-350963.	55947.4
CP.a-C.b-T.b-F.a - CP.b-C.a-T.b-F.a	*	-598383.	55947.4

CP.a-C.b-T.b-F.a - CP.b-C.b-T.a-F.a	*	283042.	55947.4
CP.a-C.b-T.b-F.a - CP.b-C.b-T.b-F.b		-20401.5	55947.4
CP.a-C.b-T.b-F.a - CP.m-C.m-T.m-F.m	*	-169459.	45680.9
CP.b-C.a-T.a-F.b - CP.b-C.a-T.b-F.a	*	-247420.	55947.4
CP.b-C.a-T.a-F.b - CP.b-C.b-T.a-F.a	*	634005.	55947.4
CP.b-C.a-T.a-F.b - CP.b-C.b-T.b-F.b	*	330562.	55947.4
CP.b-C.a-T.a-F.b - CP.m-C.m-T.m-F.m	*	181504.	45680.9
CP.b-C.a-T.b-F.a - CP.b-C.b-T.a-F.a	*	881425.	55947.4
CP.b-C.a-T.b-F.a - CP.b-C.b-T.b-F.b	*	577981.	55947.4
CP.b-C.a-T.b-F.a - CP.m-C.m-T.m-F.m	*	428923.	45680.9
CP.b-C.b-T.a-F.a - CP.b-C.b-T.b-F.b	*	-303443.	55947.4
CP.b-C.b-T.a-F.a - CP.m-C.m-T.m-F.m	*	-452501.	45680.9
CP.b-C.b-T.b-F.b - CP.m-C.m-T.m-F.m	*	-149058.	45680.9

* indica una diferencia significativa.

A continuación se procedió a analizar los costos, estos se muestran en la Tabla 6 ANOVA Costo por Concepto, en él se puede observar que si existe diferencia significativa entre los costos que afectan la utilidad, para ello la Fig. 8 Gráficos de Cajas y Bigotes de los Costos, muestra la variabilidad de los costos de calidad en función de sus niveles.

Tabla 6. ANOVA Costo por Concepto

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2.50075E13	6	4.16791E12	375.18	0.0000
Intra grupos	4.19929E12	378	1.11092E10		
Total (Corr.)	2.92067E13	384			

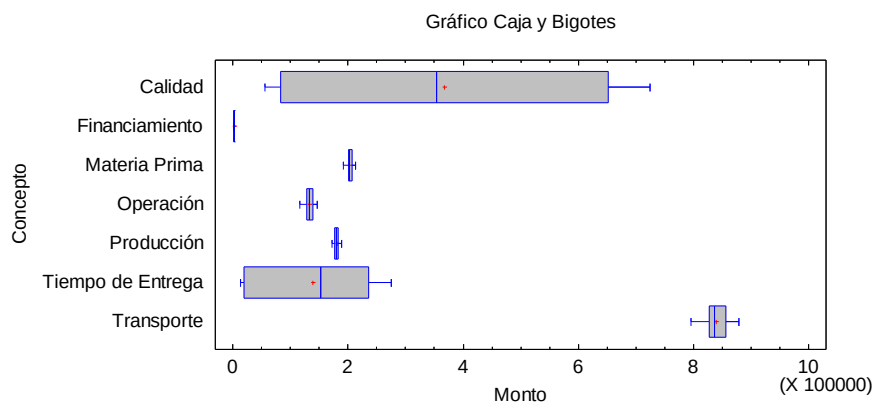


Fig. 8 Gráficos de Cajas y Bigotes de los Costos

Se puede observar en la Tabla 7. Pruebas de Múltiple Rangos para los Costos, si hay diferencia entre los niveles de calidad y la dispersión de los datos, de entre los cuales podemos ver que el tiempo de entrega también presentan una dispersión en sus datos.

Tabla 7. Pruebas de Múltiple Rangos para los Costos

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Concepto</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Financiamiento	55	1876.71	X
Operación	55	133492.	X
Tiempo de Entrega	55	138243.	X
Producción	55	180534.	X
Materia Prima	55	203129.	X
Calidad	55	366922.	X
Transporte	55	840106.	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Calidad - Financiamiento	*	365045.	39520.0
Calidad - Materia Prima	*	163793.	39520.0
Calidad - Operación	*	233430.	39520.0
Calidad - Producción	*	186388.	39520.0
Calidad - Tiempo de Entrega	*	228679.	39520.0
Calidad - Transporte	*	-473184.	39520.0
Financiamiento - Materia Prima	*	-201252.	39520.0
Financiamiento - Operación	*	-131616.	39520.0
Financiamiento - Producción	*	-178657.	39520.0
Financiamiento - Tiempo de Entrega	*	-136366.	39520.0
Financiamiento - Transporte	*	-838230.	39520.0
Materia Prima - Operación	*	69636.7	39520.0
Materia Prima - Producción		22595.4	39520.0
Materia Prima - Tiempo de Entrega	*	64886.1	39520.0
Materia Prima - Transporte	*	-636977.	39520.0
Operación - Producción	*	-47041.3	39520.0
Operación - Tiempo de Entrega		-4750.54	39520.0
Operación - Transporte	*	-706614.	39520.0
Producción - Tiempo de Entrega	*	42290.8	39520.0

Producción - Transporte	*	-659573.	39520.0
Tiempo de Entrega - Transporte	*	-701863.	39520.0

* indica una diferencia significativa.

En la Tabla 8. Porcentaje que representan los Costos, se observa el porcentaje que representa cada costo con respecto al costo total en donde el costo de transporte es el más alto, seguido de la calidad y el costo de la materia prima.

Tabla 8. Porcentaje que representan los Costos

Calidad	Tiempo de Entrega	Financiamiento	Calidad	Tiempo de Entrega	Materia Prima	Producción	Transporte	Operación	Financiamiento
Cal. Baja	Tiem. Entr. Bajo	Finan. Bajo	32.1%	1.0%	10.0%	8.9%	41.2%	6.7%	0.09%
Cal. Baja	Tiem. Entr. Bajo	Finan. Alto	32.1%	0.9%	10.0%	8.9%	41.7%	6.2%	0.09%
Cal. Alta	Tiem. Entr. Bajo	Finan. Alto	4.4%	1.1%	14.2%	12.3%	58.5%	9.5%	0.11%
Cal. Alta	Tiem. Entr. Bajo	Finan. Bajo	4.1%	1.0%	14.2%	12.5%	59.2%	8.9%	0.11%
Cal. Baja	Tiem. Entr. Alto	Finan. Alto	29.7%	11.4%	8.7%	7.9%	36.2%	6.0%	0.09%
Cal. Baja	Tiem. Entr. Alto	Finan. Bajo	30.2%	10.5%	8.9%	8.0%	36.6%	5.8%	0.09%
Cal. Alta	Tiem. Entr. Alto	Finan. Bajo	5.0%	15.0%	11.9%	10.7%	49.0%	8.2%	0.12%
Cal. Alta	Tiem. Entr. Alto	Finan. Alto	4.9%	13.4%	12.3%	10.9%	50.7%	7.7%	0.12%
Calidad Media	Tiem. Entr. Media	Finan. Medio	18.9%	8.3%	10.9%	9.7%	45.0%	7.2%	0.10%

El comportamiento de la utilidad y de los costos de manera agrupada se observa en la Fig. 9 Utilidad, Costos Totales y Sub Costos.

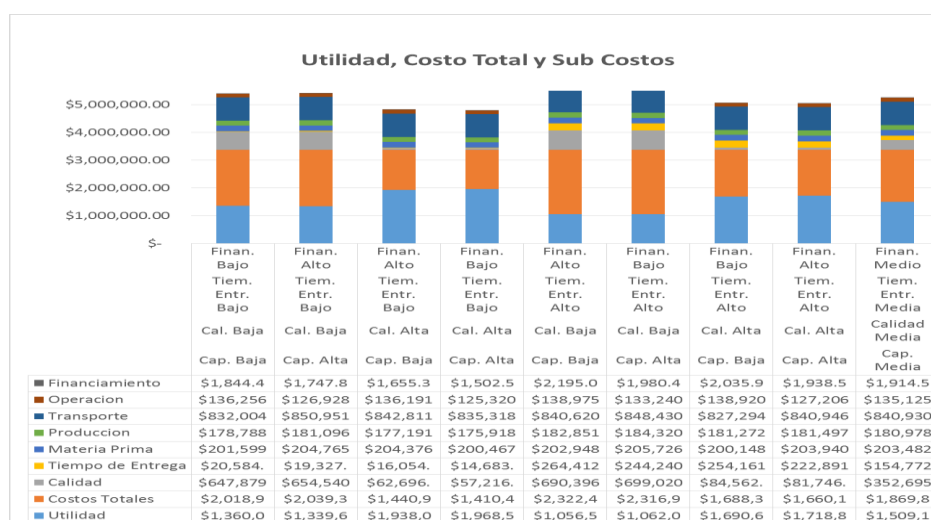


Fig. 9 Utilidad, Costos Totales y Sub Costos

La Fig.10 Utilidad Total, muestra el comportamiento de la Utilidad para cada escenario, la Fig. 11 Muestra los Costos Totales en donde se observa cómo afecta a los costos totales la alta calidad.

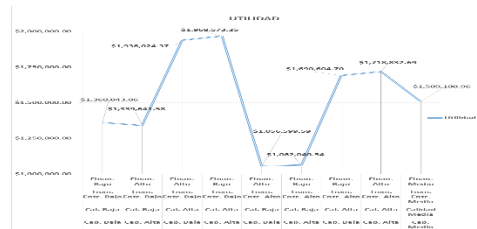


Fig. 10 Utilidad Total



Fig. 11 Costos Totales

La Fig.12 muestra el comportamiento del costo de calidad el cual es el segundo más alto de todos los costos y como en función a los niveles calidad estos pueden influir de manera importante a la utilidad, la Fig. 13 Muestra los costos de materia prima, en donde se considera el tercer costo más importante y uno de los más estables.



Fig. 12 Costo de Calidad

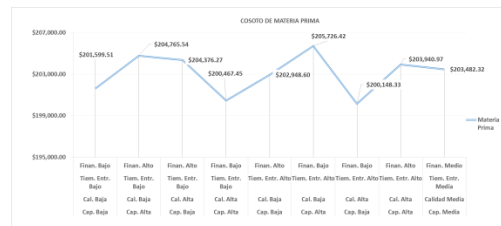


Fig. 13 Costos de Materia Prima

La Fig. 14 muestra los costos de producción lo cuales contribuyen entre un 7.9 y un 12.5 por ciento de los costos. La Fig. 15 representa el comportamiento de los costos de transporte los cuales son los más altos los cuales van desde un 41.2 a un 59.2 por ciento del total de los costos.

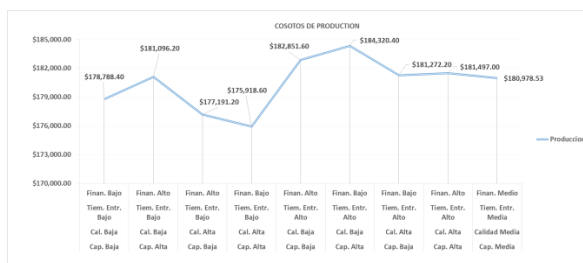


Fig. 14 Costos de Producción



Fig. 15 Costos de Transporte

Los costos de operación están expresados en la Fig. 16 en él se observan que estos son de los más bajos y estables debido a que la operación de las plantas es relativamente constante, finalmente la Fig. 17 Costos de TIIE, representa los costos más bajos el cual para las tasas actuales este no impacta de manera importante en la utilidad.



Fig. 16 Costos de Operación

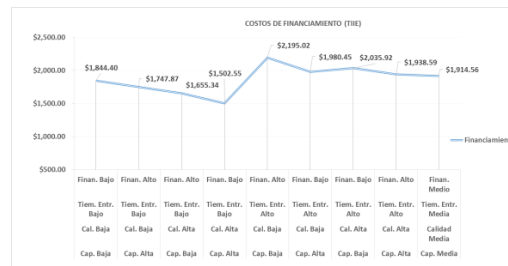


Fig. 17 Costos de TIIE

Conclusiones

El problema que se presenta en este trabajo es uno de cadena de suministro de cuatro niveles donde se toman decisiones de apertura de instalaciones y flujo entre los eslabones. El problema se modela como un programa lineal entero mixto que optimiza la utilidad en función del precio de venta del producto final y los costos involucrados. Estos costos se relacionan con: la operación de instalaciones, los costos de transporte, costos de comprar material y el costo de producir. Adicionalmente, como una contribución principal de este trabajo se agrega la modelación de los costos de calidad, cumplimiento con el tiempo de entrega y financiamiento.

El modelo maximiza la utilidad mediante la asignación de pedidos para cada uno de los eslabones de la cadena de suministro que permite cumplir con la cantidad solicitada por el cliente. Otra contribución principal de este trabajo es el análisis estadístico mediante diseño de experimentos del impacto en la utilidad ocasionado por cambios en los niveles de capacidad, calidad, tiempo de entrega y tasa de interés para cada uno de los actores que participan en la cadena de suministro.

Los resultados del análisis estadístico muestran que el componente del costo de transporte es el que más contribuye al costo total afectando la utilidad. Sin embargo, en términos de variabilidad el factor más importante es la calidad, seguido por el efecto del tiempo de

entrega. Por lo cual se recomienda una política en que en primer lugar se cuide la variabilidad de la calidad en la cadena de suministro para después atender la variabilidad con respecto al tiempo de entrega. De ser posible reducir los costos de transporte se puede lograr un mayor apalancamiento en la utilidad. Se puede observar que factor que menos influye es el financiamiento ocasionado por la tasa de interés.

Para futuras investigaciones se pretende analizar el comportamiento de la cadena de suministros integrando curvas de aprendizaje para los eslabones, las cuales demuestren el impacto y el tiempo que tomará integrar un nuevo participante en la cadena de suministro. Esto puede ser aplicado cuando algún proveedor decide incursionar en un tipo de industria diferente, en la cual tendrá que pasar por un proceso de aprendizaje para conocer los requisitos del nuevo mercado.

Referencias

- Asokan, M. V., & Unnithan, V. K. G. (1999). Estimation of vendor's process capability from the lots screened to meet specifications. *Quality Engineering*, 11(4), 537-540.
- Banco de México (2016), "Tasa de interés objetivo", disponible en www.banxico.com
- Bellido, W. M. (2011). Dinámica macroeconómica con metas de inflación y déficit fiscal (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Posgrado. Mención: Economía).
- Bera, S., & Mukherjee, I. (2013). An integrated approach based on principal component and multivariate process capability for simultaneous optimization of location and dispersion for correlated multiple response problems. *Quality Engineering*, 25(3), 266-281.
- Castillo-Villar, K. et al. (2012) "A Model for Supply Chain Design Considering the Cost of Quality". *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 36 (12): pp. 5920–5935.
- Chan, L. K., Cheng, S. W., & Spiring, F. A. (1991). A multivariate measure of process capability. *International journal of modelling & simulation*, 11(1), 1-6.
- Chou, Y. M. (1994). Selecting a better supplier by testing process capability indices. *Quality Engineering*, 6(3), 427-438.
- Das, K. (2011). A quality integrated strategic level global supply chain model. *International Journal of Production Research*, 49(1), 5-31.

- Diario Oficial de la Federación de México (1995, 23 de marzo). Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio y Tasa de Interés Interbancaria Promedio. [en línea]. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/OA/BM/Disposiciones/TASA%20DE%20INTERES%20INTERBANCARIA%20DE%20EQUILIBRIO.pdf> [2015, 1 de diciembre]
- Diario Oficial de la Federación de México (31 de julio de 1998). Buenas prácticas de fabricación para establecimientos de la industria químico farmacéutica dedicados a la fabricación de medicamentos NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SSA1-2006. [en línea]. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4888628&fecha=31/07/1998 [2016, 5 de marzo]
- Elahi, B., Pakzad-Jafarabadi, Y., Etaati, L., & Seyedhosseini, S. M. (2011). Optimization of supply chain planning with considering defective rates of products in each echelon. *Technology and Investment*, 2(03), 211.
- Fang, H., & Xiao, R. (2014). Cycle quality chain early warning network with e-channel lead time disruption. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 1(1), 47-67.
- Fathollah Bayati M. et al. (2011) A joint lot-sizing and marketing model with reworks, scraps and imperfect products. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2. pp. 395–408.
- Franca, R. B., Jones, E. C., Richards, C. N., & Carlson, J. P. (2010). Multi-objective stochastic supply chain modeling to evaluate tradeoffs between profit and quality. *International Journal of Production Economics*, 127(2), 292-299.
- Hejazi, S. R., Tsou, J. C., & Barzoki, M. R. (2008). Optimal lot size of EPQ model considering imperfect and defective products. *Journal of Industrial Engineering International*, 4(7), 59-68.
- Hernández, L. G. (2010). Identificación de los tipos de interés en México como variable de riesgo país y su efecto en las decisiones de inversión de las EMN: Un análisis por correspondencias para el caso de BBVA Bancomer.

- Hsu, B. M., Hsu, L. Y., & Shu, M. H. (2013). Evaluation of supply chain performance using delivery-time performance analysis chart approach. *Journal of Statistics and Management Systems*, 16(1), 73-87.
- Hsu, C. C., Tan, K. C., Kannan, V. R., & Keong Leong, G. (2009). Supply chain management practices as a mediator of the relationship between operations capability and firm performance. *International Journal of Production Research*, 47(3), 835-855.
- Javid, A., & Hoseinpour, P. P. (2010). A Model for Quality Management in a Supply Chain with a Retailer and a Manufacturer. *South African Journal of Industrial Engineering*, 21(1), 103-111.
- Kane, V. E. (1986). Process Capability Indices. *Journal of Quality Technology*, 18 (1). Pp. 41-52.
- Johnson, N. L., & Kotz, S. (2002). Process capability indices-a review, 1992-2000. *Journal of Quality Technology*, 34(1).
- Kumar, S., McCreary, M. L., & Nottestad, D. A. (2011). Quantifying supply chain trade-offs using six sigma, simulation, and designed experiments to develop a flexible distribution network. *Quality Engineering*, 23(2), 180-203.
- León, J., & Alvarado, C. (2015). México: estabilidad de precios y limitaciones del canal de crédito bancario. *Problemas del desarrollo*, 46(181), 75-100.
- Linn, R. J., Tsung, F., & Ellis, L. W. C. (2006). Supplier selection based on process capability and price analysis. *Quality Engineering*, 18(2), 123-129.
- Lundkvist, P., Vännman, K., & Kulahci, M. (2012). A comparison of decision methods for C pk when data are autocorrelated. *Quality Engineering*, 24(4), 460-472.
- Madadi, A., Kurz, M. E., Mason, S. J., & Taaffe, K. M. (2014). Supply chain design under quality disruptions and tainted materials delivery. *Transportation Research Part E: Logísticas and Transportation Review*, 67, 105-123.
- Pearn, W. L., & Kotz, S. (2006). *Encyclopedia and Handbook of Process Capability Indices: A Comprehensive Exposition of Quality Control Measures (Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics)*. World Scientific Publishing Co., Inc.
- Ron, D. F. (2003) "Eficiencia en la Transmisión de la Política Monetaria En México La Cadena: "Corto", Tasa de Interés Interbancaria y Tasas de Deposito.

- Singhal, S. C. (1991). Multiprocess performance analysis chart (MPPAC) with capability zones. *Quality Engineering*, 4(1), 75-81.
- Shen, C. Y., & Yu, K. T. (2012). An integrated fuzzy strategic supplier selection approach for considering the supplier integration spectrum. *International Journal of Production Research*, 50(3), 817-829.
- Shu, M. H., & Wu, H. C. (2014). Supplier Evaluation and Selection Based on Stochastic Dominance: A Quality-Based Approach. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 43(14), 2907-2922.
- Solorza, M. (2015). Límites a la esterilización en la política monetaria de los bancos centrales, México y Colombia. *Revista Republicana*, (15).
- Tang, X., & Rai, A. (2012). The moderating effects of supplier portfolio characteristics on the competitive performance impacts of supplier-facing process capabilities. *Journal of Operations Management*, 30(1), 85-98.
- Tang, X., & Rai, A. (2014). How should process capabilities be combined to leverage supplier relationships competitively?. *European Journal of Operational Research*, 239(1), 119-129.
- The European Chemical Industry Council CEFIC (1996). Good manufacturing practices for active ingredient manufacturers. European Federation of Pharmaceutical Industries

Conclusiones

El problema analizado para el diseño de la cadena de suministro está compuesto por cuatro niveles, en donde se toman decisiones de apertura de instalaciones y flujo entre los eslabones de la misma, compuestos por: proveedores, fabricantes, centros de distribución y clientes. Dicho problema se modela como un programa matemático de optimización lineal entero mixto. En un primer acercamiento en el modelo se consideró evaluar la capacidad y la calidad, así como los costos de materia prima, operación, transporte y fabricación. Los resultados permiten concluir que la calidad afecta en las decisiones del diseño de la cadena de suministro, así como el transporte, como los elementos más significativos del costo total. Una de las contribuciones más importantes es el uso del Cpk como elemento del modelo para el cálculo de los costos de calidad, el cual sirve como elemento crucial para la estimación del porcentaje de producto no conforme. El costo de calidad incluye el costo ocasionado por los reprocesos y retrabajos de los productos fuera de especificación. Una vez aplicado el diseño de experimentos factorial se procedió a realizar el análisis de los resultados de la optimización de cada escenario por medio del Análisis de Varianza (ANOVA) y así determinar los factores que son determinantes para la afectación del costo total en función de la significancia resultante.

El artículo que se desarrollo sobre este primer acercamiento fue llamado “Minimization of costs in a supply chain considering the impact of quality”, y fué sometido para publicación en el International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics (IJCOPI), cuya recepción se muestra en el Anexo 1.

Un segundo trabajo, que es extensión del anterior, hace un análisis de la afectación a la utilidad en el diseño de la cadena de suministro, cuando en ella existen cambios en niveles de: capacidad, calidad, tiempo de entrega y tasa de interés de financiamiento. Para este trabajo se desarrolló un diseño de experimentos factorial fraccionado. Los resultados de optimización del modelo para cada experimento (escenario) se analizaron por un ANOVA para determinar la significancia de los factores estudiados. Las conclusiones del análisis son que, desde el punto de vista de costos, el costo de transporte es el más relevante debido a que es el más alto. Considerando la variabilidad, la calidad es el factor que ofrece mayor

oportunidad de mejora a la utilidad debido a la dispersión que presentan los resultados. Para el diseño de la cadena es importante considerar como primera instancia una política que reduzca la variabilidad de la calidad en la cadena de suministro para después atender la variabilidad con respecto al tiempo de entrega. Por otro lado la reducción de los costos de transporte puede lograr un incremento significativo en la utilidad por su efecto de apalancamiento. Así mismo un elemento que está presente pero que es menos influyente es el financiamiento, esto por la magnitud de la tasa de interés que se utilizó en las instancias.

El artículo que se desarrollo sobre este segundo acercamiento fue llamado “Maximización de la Utilidad en la Cadena de Suministro Considerando variación en Capacidad, Calidad, Tiempo de Entrega y Tasa de Interés”, que fue sometido a publicación en la Revista Electrónica Nova Scientia, cuya recepción se muestra en el anexo2.

Un futuro modelo que dé respuesta al diseño en la cadena de suministro podría incluir el examen de las posibles no linealidades en el comportamiento de los costos. También se puede estudiar el efecto de las curvas de aprendizaje para los proveedores y las fábricas que se incorporen a la cadena de suministro, a través del tiempo. Una extensión lógica de la investigación es utilizar datos reales de una cadena de suministro para validar las decisiones resultantes con los practicantes. Cabe mencionar que los modelos desarrollados pueden ser aplicables a diversas industrias.

Referencias

- Agus, A. (2008). The strategic supplier partnership in a supply chain management with quality and business performance. *International Journal of Business and Management Science*, 1(2), 129
- Aramyan, L. H., Meuwissen, M. P., Oude Lansink, A. G., van der Vorst, J. G., van Kooten, O., & Van der Lans, I. A. (2009). The perceived impact of quality assurance systems on tomato supply chain performance. *Total Quality Management*, 20(6), 633-653
- Asokan, M. V., & Unnithan, V. K. G. (1999). Estimation of vendor's process capability from the lots screened to meet specifications. *Quality Engineering*, 11(4), 537-540.
- Banco de México (2016), "Tasa de interés objetivo", disponible en www.banxico.com
- Bellido, W. M. (2011). Dinámica macroeconómica con metas de inflación y déficit fiscal (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Posgrado. Mención: Economía).
- Bera, S., & Mukherjee, I. (2013). An integrated approach based on principal component and multivariate process capability for simultaneous optimization of location and dispersion for correlated multiple response problems. *Quality Engineering*, 25(3), 266-281.
- Castillo-Villar, K. K., Smith, N. R., & Simonton, J. L. (2012). A model for supply chain design considering the cost of quality. *Applied Mathematical Modelling*, 36(12), 5920-5935
- Chan, L. K., Cheng, S. W., & Spiring, F. A. (1991). A multivariate measure of process capability. *International journal of modelling & simulation*, 11(1), 1-6.
- Chou, Y. M. (1994). Selecting a better supplier by testing process capability indices. *Quality Engineering*, 6(3), 427-438.
- Cudney, E. A., & Kestle, R. (2010). *Implementing Lean Six Sigma Throughout the Supply Chain: The Comprehensive and Transparent Case Study*. CRC Press
- Das, K. (2011). A quality integrated strategic level global supply chain model. *International Journal of Production Research*, 49(1), 5-31.
- Diario Oficial de la Federación de México (1995, 23 de marzo). Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio y Tasa de Interés Interbancaria Promedio. [en línea]. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/OA/BM/Disposiciones/TASA%20DE%20I>

- INTERES%20INTERBANCARIA%20DE%20EQUILIBRIO.pdf [2015, 1 de diciembre]
- Diario Oficial de la Federación de México (31 de julio de 1998). Buenas prácticas de fabricación para establecimientos de la industria químico farmacéutica dedicados a la fabricación de medicamentos NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SSA1-2006. [en línea]. Disponible en: http://www.http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4888628&fecha=31/07/1998 [2016, 5 de marzo]
- Elahi, B., Pakzad-Jafarabadi, Y., Etaati, L., & Seyedhosseini, S. M. (2011). Optimization of supply chain planning with considering defective rates of products in each echelon. *Technology and Investment*, 2(03), 211.
- Fang, H., & Xiao, R. (2014). Cycle quality chain early warning network with e-channel lead time disruption. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 1(1), 47-67.
- Fathollah Bayati M. et al. (2011) A joint lot-sizing and marketing model with reworks, scraps and imperfect products. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2. pp. 395–408.
- Franca, R. B., Jones, E. C., Richards, C. N., & Carlson, J. P. (2010). Multi-objective stochastic supply chain modeling to evaluate tradeoffs between profit and quality. *International Journal of Production Economics*, 127(2), 292-299.
- Gregorio Cabrero, R. (2014). Gestión de una planta productiva con el uso de indicadores Lean Manufacturing
- Hejazi, S. R., Tsou, J. C., & Barzoki, M. R. (2008). Optimal lot size of EPQ model considering imperfect and defective products. *Journal of Industrial Engineering International*, 4(7), 59-68.
- Hernández, L. G. (2010). Identificación de los tipos de interés en México como variable de riesgo país y su efecto en las decisiones de inversión de las EMN: Un análisis por correspondencias para el caso de BBVA Bancomer.
- Hsu, B. M., Hsu, L. Y., & Shu, M. H. (2013). Evaluation of supply chain performance using delivery-time performance analysis chart approach. *Journal of Statistics and Management Systems*, 16(1), 73-87.

- Hsu, C. C., Tan, K. C., Kannan, V. R., & Keong Leong, G. (2009). Supply chain management practices as a mediator of the relationship between operations capability and firm performance. *International Journal of Production Research*, 47(3), 835-855.
- Javid, A., & Hoseinpour, P. P. (2010). A Model for Quality Management in a Supply Chain with a Retailer and a Manufacturer. *South African Journal of Industrial Engineering*, 21(1), 103-111.
- Johnson, N. L., & Kotz, S. (2002). Process capability indices-a review, 1992-2000. *Journal of Quality Technology*, 34(1).
- Kane, V. E. (1986). Process Capability Indices. *Journal of Quality Technology*, 18 (1). Pp. 41-52.
- Kumar, S., McCreary, M. L., & Nottestad, D. A. (2011). Quantifying supply chain trade-offs using six sigma, simulation, and designed experiments to develop a flexible distribution network. *Quality Engineering*, 23(2), 180-203.
- León, J., & Alvarado, C. (2015). México: estabilidad de precios y limitaciones del canal de crédito bancario. *Problemas del desarrollo*, 46(181), 75-100.
- Linn, R. J., Tsung, F., & Ellis, L. W. C. (2006). Supplier selection based on process capability and price analysis. *Quality Engineering*, 18(2), 123-129.
- Lundkvist, P., Vännman, K., & Kulahci, M. (2012). A comparison of decision methods for C pk when data are autocorrelated. *Quality Engineering*, 24(4), 460-472.
- Madadi, A., Kurz, M. E., Mason, S. J., & Taaffe, K. M. (2014). Supply chain design under quality disruptions and tainted materials delivery. *Transportation Research Part E: Logísticas and Transportation Review*, 67, 105-123.
- Osiro, L., Lima-Junior, F. R., & Carpinetti, L. C. R. (2014). A fuzzy logic approach to supplier evaluation for development. *International Journal of Production Economics*, 153, 95-112
- Pearn, W. L., & Kotz, S. (2006). *Encyclopedia and Handbook of Process Capability Indices: A Comprehensive Exposition of Quality Control Measures (Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics)*. World Scientific Publishing Co., Inc.
- Ron, D. F. (2003) "Eficiencia en la Transmisión de la Política Monetaria En México La Cadena: "Corto", Tasa de Interés Interbancaria y Tasas de Deposito.

- Shen, C. Y., & Yu, K. T. (2012). An integrated fuzzy strategic supplier selection approach for considering the supplier integration spectrum. *International Journal of Production Research*, 50(3), 817-829.
- Shu, M. H., & Wu, H. C. (2014). Supplier Evaluation and Selection Based on Stochastic Dominance: A Quality-Based Approach. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 43(14), 2907-2922.
- Singhal, S. C. (1991). Multiprocess performance analysis chart (MPPAC) with capability zones. *Quality Engineering*, 4(1), 75-81.
- Solorza, M. (2015). Límites a la esterilización en la política monetaria de los bancos centrales, México y Colombia. *Revista Republicana*, (15).
- Tang, X., & Rai, A. (2012). The moderating effects of supplier portfolio characteristics on the competitive performance impacts of supplier-facing process capabilities. *Journal of Operations Management*, 30(1), 85-98.
- Tang, X., & Rai, A. (2014). How should process capabilities be combined to leverage supplier relationships competitively?. *European Journal of Operational Research*, 239(1), 119-129.
- The European Chemical Industry Council CEFIC (1996). Good manufacturing practices for active ingredient manufacturers. European Federation of Pharmaceutical Industries.

Anexo 1

Correo de Recepción Art. 1 “Minimization of costs in a supply chain considering the impact of quality”

28/3/2016

Imprimir

Asunto: [IJCOPI] Submission Acknowledgement

De: Dr. Jorge A. Ruiz-Vanoye (editor@ijcopi.org)

Para: daniel_olivares_vera@yahoo.com.mx;

Fecha: Viernes, 18 de marzo, 2016 0:05:30

Daniel Arturo Olivares Vera:

Thank you for submitting the manuscript, "Minimization of costs in a supply chain considering the impact of quality" to International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics. With the online journal management system that we are using, you will be able to track its progress through the editorial process by logging in to the journal web site:

Manuscript URL:

<http://ijcopi.org/ojs/index.php?journal=ijcopi&page=author&op=submission&path%5B%5D=211>

Username: danielolivares

If you have any questions, please contact me. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

Dr. Jorge A. Ruiz-Vanoye

International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics

Anexo 2

Correo de Recepción Art. 2 “Maximización de la Utilidad en la Cadena de Suministro Considerando variación en Capacidad, Calidad, Tiempo de Entrega y Tasa de Interés”

28/3/2016

Imprimir

Asunto: [NS] Acuse de recibo de envío

De: Revista Nova Scientia (nova_scientia@delasalle.edu.mx)

Para: daniel_olivares_vera@yahoo.com.mx;

Fecha: Jueves, 17 de marzo, 2016 23:05:34

Apreciable Daniel Arturo Olivares Vera:

Gracias por enviar el manuscrito "Maximización de la Utilidad en la Cadena de Suministro Considerando variación en Capacidad, Calidad, Tiempo de Entrega y Tasa de Interés" a Nova Scientia. Con nuestro sistema de gestión editorial en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial.

URL del manuscrito:

<http://novascientia.delasalle.edu.mx/ojs/index.php/Nova/author/submission/511>

Nombre de usuario/a: daniel_olivares_vera

Una vez completado el proceso de arbitraje, le haremos llegar la resolución tomada por el Consejo Editorial.

SOLICITAMOS NOS RECOMIENDE A 5 POSIBLES EVALUADORES DE SU TRABAJO.

Le agradecemos su valiosa contribución para la Revista Nova Scientia.

http://nova_scientia.delasalle.edu.mx/

Tel. 01 477 7 10 85 00 ext. 356

Nova Scientia ISSN 2007 - 0705

<http://novascientia.delasalle.edu.mx/>