

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE REDISTRIBUCIÓN DE
PLANTA

DANIEL CARDONA OLARTE
JUAN DIEGO FORERO FORERO

UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2012

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE REDISTRIBUCIÓN DE
PLANTA

DANIEL CARDONA OLARTE
JUAN DIEGO FORERO FORERO

Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial

Director
Leonardo Rivera Cadavid
Jefe Depto. de Ingeniería Industrial
Ph.D. in Industrial Engineering

UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2012

CONTENIDO

	pág.
1. ELECCIÓN Y DELIMITACIÓN DEL TEMA	8
1.1 PROBLEMA A TRATAR	8
1.1.1 Planteamiento del problema	8
1.1.2 Análisis del problema	8
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	11
1.3 DELIMITACIÓN Y ALCANCE	12
1.3.1 Tiempo	13
1.3.2 Espacio	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GENERAL	14
2.2 OBJETIVO DEL PROYECTO	14
2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. METODOLOGÍA	15
3.1 Seleccionar un conjunto de métodos de ingeniería económica que sean compatibles con las características de los proyectos de redistribución de planta.	15
3.2 Identificar los costos que genera un proyecto de redistribución de planta a lo largo del horizonte de planeación.	15
3.3 Identificar los beneficios económicos que genera un proyecto de redistribución de planta a lo largo del horizonte de planeación.	16
3.4 Desarrollar una metodología que adapte cada método de ingeniería económica seleccionado a las condiciones específicas de los proyectos de redistribución de planta.	16
4. MARCO DE REFERENCIA	17
4.1 ANTECEDENTES	17
4.1.1 Métodos de evaluación económica aplicados en trabajos de proyectos de redistribución de planta grado en las universidades de Cali	17
4.2 MARCO TEÓRICO	19
4.2.1 Distribución de planta	19
4.2.2 Redistribución de planta	28
4.2.3 Proyectos de inversión	29
4.2.4 Metodologías de evaluación económica para proyectos de inversión	31
4.2.5 Estimación de Costos de un proyecto	45
4.2.6 Costos de implementación de un proyecto de redistribución de planta	50
4.2.7 Ingeniería económica	52
4.3 APORTE CRÍTICO	53
5. ADMINISTRACIÓN DEL PROYECYO	55
5.1 RECURSOS	55
5.1.1 Recursos de trabajo	55
5.1.2 Recurso Humano	55

5.1.3 Recursos Económicos	56
5.2 EQUIPO DE INVESTIGADORES	56
5.3 MATRIZ DE MARCO LÓGICO	56
6. DESARROLLO DEL PROYECTO	57
6.1 SELECCIONAR UN CONJUNTO DE MÉTODOS DE INGENIERÍA ECONÓMICA QUE SEAN COMPATIBLES CON LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PROYECTOS DE REDISTRIBUCIÓN DE PLANTA	57
6.1.1 Proyecto de redistribución de planta	57
6.1.2 ¿Por qué se hace?	57
6.1.3 Fases de un proyecto	57
6.1.4 Fases de un proyecto de redistribución de planta	60
6.1.5 Riesgos de un proyecto	61
6.1.5 Tipos	62
6.1.6 Delimitación del tipo de proyecto	64
6.1.7 Selección del método de evaluación económica	64
6.1.8 Consideraciones sobre el método seleccionado	73
6.2 IDENTIFICAR LOS COSTOS QUE GENERA UN PROYECTO DE REDISTRIBUCIÓN DE PLANTA A LO LARGO DEL HORIZONTE DE PLANEACIÓN	74
6.2.1 Clasificación de los costos de reorganizar los departamentos	74
6.2.2 Clasificación de artículos de <i>DFLP</i> según las categorías de costos	77
6.2.3 Clasificación de los costos típicos de un proyecto de redistribución de planta	79
6.3 IDENTIFICAR LOS BENEFICIOS QUE GENERA UN PROYECTO DE REDISTRIBUCIÓN A LO LARGO DEL HORIZONTE DE PLANEACIÓN	85
6.3.1 Consideraciones del modelo	87
6.3.2 Descripción del modelo	89
6.3.3 Metodología del cálculo del <i>WIP</i> y <i>MHC</i>	91
6.3.4 Cálculo de los parámetros del modelo	92
6.3.5 Cálculo del <i>WIP</i>	103
6.3.6 Cálculo del <i>MHC</i>	105
6.3.7 Evaluación económica del <i>WIP</i> y <i>MHC</i>	106
6.4 DESARROLLAR UNA METODOLOGÍA QUE ADAPTE CADA MÉTODO DE INGENIERÍA ECONÓMICA SELECCIONADO A LAS CONDICIONES ESPECÍFICAS DE LOS PROYECTOS DE REDISTRIBUCIÓN DE PLANTA.	106
6.4.1 Módulo Costos	107
6.4.2 Beneficios	118
6.4.3 Procesamiento de la información	121
6.4.4 Módulo de resultados	122
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	123
7.1 CONCLUSIONES	123
7.2 FUTURA INVESTIGACIÓN	124
BIBLIOGRAFÍA	126
ANEXOS	142

Anexo A: Métodos de evaluación aplicados en los trabajos de grado de proyectos de redistribución de planta en las universidades de Cali.	143
Anexo B: MATRIZ DE MARCO LÓGICO	149
Anexo C: Cronograma	153

LISTA DE GRÁFICOS

pág.

Figura 1 Métodos de evaluación económica aplicados en los trabajos de grado de proyectos de redistribución de planta en las universidades de Cali.....	18
Figura 2. Problemas a resolver con la distribución en planta.....	19
Figura 3. Tabla Origen-Destino.....	26
Figura 4. Clasificación de metodologías de evaluación económica de proyectos de inversión	32
Figura 5. Interpolación para hallar la TIR	39
Figura 6. Proceso de estimación de costos	46
Figura 7 Red de colas abierta con múltiples transportadores	89
Figura 8 Proceso de un producto con ruta (inicio-DP ₁ -DP ₂ -salida)	91
Figura 9 Agregación tasas de arribos	93
Figura 10 Tasas de arribos agregadas	94
Figura 11 Funcionamiento de la Metodología	107

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Frecuencia de los métodos aplicados en los trabajos de grado de proyectos de redistribución de planta en las universidades de Cali.....	18
Tabla 2. Costos de un proyecto de mejoramiento de instalaciones.....	51
Tabla 3 Clasificación de Costos de los Artículos de DFLP	77
Tabla 4 Frecuencia de los artículos por clasificación de costos	79
Tabla 5 Resultados	122

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1 Puntaje basado en adyacencias	25
Ecuación 2. Distancia euclidiana	27
Ecuación 3. Distancia rectilínea	27
Ecuación 4. Costo de manejo de materiales	27
Ecuación 5. Average tie-up	35
Ecuación 6. VPN	36
Ecuación 7. Anualidad	38
Ecuación 8. VPN Igual a cero	38
Ecuación 9. TIR	39
Ecuación 10. Periodo de Recuperación dinámico.....	40
Ecuación 11. Flujos de caja compuestos 1	40
Ecuación 12. Flujo de caja compuestos 2.....	40
Ecuación 13. Flujo de caja compuestos 3.....	41
Ecuación 14. Estimación de costos por tres valores.....	49
Ecuación 15 Directores del proyecto	80
Ecuación 16 Instalaciones eléctricas	81
Ecuación 17 Tuberías	81
Ecuación 18 Equipo para reorganizar	83
Ecuación 19 <i>Outsourcing</i>	83
Ecuación 20 Costo oportunidad del dinero en inventario	84
Ecuación 21 Ventas Perdidas	85
Ecuación 22 Ahorro en servicios públicos	85
Ecuación 23	95
Ecuación 24	95
Ecuación 25	95
Ecuación 26	95
Ecuación 27	96
Ecuación 28 Tasas de llegada del producto <i>i</i> al departamento <i>j</i> (λ_{pij})	96
Ecuación 29 Tasa de arribos agregada al departamento <i>j</i> (λ_j)	96
Ecuación 30	97
Ecuación 31 Tasa de arribos agregada al transportador <i>t</i> (λ_{tt})	97
Ecuación 32	97
Ecuación 33 Tiempo esperado de servicio en un departamento <i>j</i> ($E[S_j]$)	97
Ecuación 34	98
Ecuación 35	98
Ecuación 36	98
Ecuación 37	99
Ecuación 38	99
Ecuación 39	99
Ecuación 40	99

Ecuación 41 Tiempo esperado de servicio del transportador t ($E[Stt]$).....	99
Ecuación 42	99
Ecuación 43	99
Ecuación 44	100
Ecuación 45 Coeficiente de variación cuadrático del tiempo de servicio en el departamento j ($Csj2$)	100
Ecuación 46	100
Ecuación 47	100
Ecuación 48	100
Ecuación 49 Coeficiente de variación cuadrático del tiempo de servicio en el transportador t ($CStt2$).....	101
Ecuación 50	101
Ecuación 51	101
Ecuación 52	101
Ecuación 53	101
Ecuación 54	102
Ecuación 55	102
Ecuación 56	102
Ecuación 57	102
Ecuación 58	102
Ecuación 59 Coeficiente de variación cuadrático para las tasas de arribos al departamento 0 ($Ca02$)	103
Ecuación 60 Coeficiente de variación cuadrático para las tasas de arribos al departamento j ($Caj2$)	103
Ecuación 61 Coeficiente de variación cuadrático para las tasas de arribos al transportador t ($Catt2$).....	103
Ecuación 62	103
Ecuación 63	104
Ecuación 64	104
Ecuación 65	104
Ecuación 66	104
Ecuación 67 WIP del producto i en el departamento j	105
Ecuación 68 WIP del producto i en el transportador t	105
Ecuación 69 WIP de la planta	105
Ecuación 70 Costo de MHC	106

1. ELECCIÓN Y DELIMITACIÓN DEL TEMA

1.1 PROBLEMA A TRATAR

1.1.1 Planteamiento del problema

En Cali, se evidenció que el 52% de las propuestas de proyectos de redistribución de planta, no realizaban ningún tipo de evaluación económica. Lo que muestra una oportunidad de mejora en el proceso de evaluación de este tipo de proyectos.

1.1.2 Análisis del problema

El proceso de determinar la mejor organización física del sistema de producción se define como el problema de distribución de planta o FLP (*facility layout problem*).

El FLP ha sido ampliamente estudiado, debido a su impacto en los costos operativos de las organizaciones, ya que el manejo de materiales generalmente representa el 87% del tiempo de producción, el 25% de los empleados, el 55% del espacio de la fábrica, entre el 15 y el 70% del costo total del producto terminado¹ y entre un 20 y un 50% de los costos de producción². Se han desarrollado diversos estudios sobre el FLP con el objetivo de minimizar los costos de operación y maximizar la eficiencia dentro de una planta.

Un proyecto de redistribución de planta es un programa de actividades requeridas para mejorar el desempeño del sistema, mediante la reorganización de los recursos y equipos desde las posiciones actuales a nuevas posiciones.

Una planeación de instalaciones eficaz puede reducir los costos de manejo de materiales entre 10 y 30%.

En la práctica son más comunes los proyectos de redistribución de planta³, debido a los cambios en las tecnologías de manufactura, en el diseño del producto, en el proceso de manufactura, en la situación del mercado, en las rutas de producción de los productos, en las regulaciones de seguridad, entre otros⁴. Esta volatilidad del entorno genera que la vida efectiva de los sistemas de producción se reduzca.

¹ TOMPKINS, James y WHITE, John, *et al.* Planeación de instalaciones. Thomson. 3 ed. 164 p

² CIGANOVIC, Renato y TATES, Mikael. A model for assessing cost effectiveness of facility layouts- A case study. Tesis de Grado. Smaland: Växjö University, 2006. 27 p.

³ KULTUREL-KONAK, Sadan; SMITH, Alice E. y NORMAN, Bryan A. Bi-objective facility expansion and relayout considering monuments. *En: IIE Transactions*. 2007. Vol. 39, p. 747–761.

⁴ VIJAYVARGIYA, Mool. Developing a mathematical model for scheduling re-layout projects. Tesis de Maestría en Ciencias. Ohio: Ohio University. Facultad de Ingeniería y Tecnología, 1994. 3 p.

Sin embargo el problema de redistribución de planta FRLP (*Facility Re-Layout Problem*) no ha logrado atraer la atención de muchos investigadores en el campo de la planeación de distribución de planta⁵.

La evaluación de proyectos es un instrumento que mide objetivamente ciertas magnitudes cuantitativas resultantes del estudio del proyecto; para medir objetivamente las premisas y supuestos, éstas deben nacer de la realidad misma en la que el proyecto estará inserto y en el que deberá retornar sus beneficios⁶.

Para la comparación de diferentes distribuciones de planta, se usa generalmente el costo de manejo de materiales. Las organizaciones suelen identificar mejoras en el tiempo de ciclo y en las adyacencias importantes, pero también es de gran interés el identificar qué impacto económico tiene la nueva distribución ¿Genera ahorros o pérdidas? Muchas investigaciones han generado soluciones para la etapa de diseño de las distribuciones de planta, pero hay una escasez de soluciones en la etapa de la evaluación⁷.

En Cali se pudo evidenciar esta escasez en las propuestas de proyectos de redistribución de planta realizadas en trabajos de grados de las universidades de la ciudad, encontrándose que el 52% de las propuestas carecían de una evaluación económica.

Actualmente existe una variedad de métodos para la evaluación de proyectos de inversión, los cuales pueden clasificarse en métodos básicos, avanzados, de múltiples criterios y bajo incertidumbre. Se evidencio también que el 48% restante de las propuestas, solo utilizaban métodos evaluación básicos.

1.1.2.1 Causas

Se ha encontrado que el FRLP no ha sido objeto de un amplio estudio como el FLP, lo que sugiere un aún menor desarrollo en la manera de evaluarlos.

Los métodos de valoración económica se desarrollaron con el objetivo de evaluar proyectos de inversión en general, mas no para evaluar específicamente proyectos de redistribución de planta, los cuales presentan características particulares que merecen un tratamiento especial. Lo anterior causa que las empresas evalúen los proyectos según sus consideraciones, lo que no garantiza que se tengan en cuenta riesgos y oportunidades característicos de este tipo de proyectos. La ingeniería económica es la aplicación de técnicas de análisis

⁵ Ibid.,p.2.

⁶ SAPAG CHAIN, Nassir y SAPAG CHAIN, Reinaldo. Preparación y evaluación de proyectos. 4 ed. McGraw-Hill, 2003. 11 p.

⁷ CIGANOVIC y TATES. Op. cit., p. 2.

económico para la comparación de alternativas de diseño de ingeniería, lo que muestra un acercamiento a la evaluación de los proyectos de redistribución de planta, pero éstos presentan condiciones específicas que deberían considerarse.

Muchas de las motivaciones para desarrollar un proyecto de redistribución de planta no son enteramente económicas. Los ingenieros industriales pretenden mejorar el rendimiento del sistema productivo en diferentes aspectos funcionales que no necesariamente van encaminados a reducir costos. No obstante las empresas en general, para implementar algún proyecto, deben evidenciar los beneficios económicos que se generarán.

1.1.2.2 Efectos

En el momento en que la demanda varía lo suficiente para que los flujos interdepartamentales tengan prioridades diferentes a las que tenían en el momento del diseño de la distribución, ésta se vuelve obsoleta. De aquí se genera el riesgo que representa la variabilidad en la demanda para los proyectos de redistribución de planta. Este riesgo es un factor crítico a tener en cuenta al momento de evaluar un proyecto de este tipo. No considerarlo interfiere con la exactitud de la evaluación del proyecto y podría llevar a tomar una decisión errónea.

Es posible que se esperen ahorros mayores o costos menores a los que se obtendrán después de la implementación, haciendo que el flujo de caja del proyecto sea inferior al esperado, generando el fracaso del proyecto al no cumplir con el propósito para el que fue llevado a cabo.

Extendiendo el efecto anterior y reflejando aún más la importancia de una precisa evaluación económica del proyecto, se encuentra la posibilidad de llevar a cabo una redistribución de planta que, de ser correctamente evaluada, hubiera sido económicamente inaceptable. Lo anterior no solo causará el fracaso del proyecto sino que tendrá un alto potencial de generar pérdidas monetarias para la empresa.

1.1.2.3 Impacto

Actualmente los proyectos de redistribución de planta son más comunes que los de distribución de planta, además como se evidencio en el estudio realizado en las universidades de Cali, el 52% de las propuestas de redistribución, no aplicaban ningún tipo de evaluación económica, entonces el proyecto tendrá un gran impacto al presentar una guía para evaluarlos económicamente.

Las empresas se desenvuelven en un mercado altamente volátil por lo que determinar la demanda futura es crítico, pero en muchos casos este pronóstico no

es preciso. Entre más grande sea la varianza de éstos, más grande serán los riesgos asociados al proyecto, por lo que éstos últimos deben ser considerados y cuantificados en el proyecto⁸.

Cuando se realiza un proyecto de redistribución de planta, después de obtener el nuevo diseño, éste se somete a una evaluación por los directivos para aprobarlo, en algunos casos éste rediseño no es aprobado y se tiene que modificar todo el proyecto hasta que sea aprobado. Este proceso de decisión demanda mucho tiempo, ocasionando que la implementación del proyecto se retrase. Uno de los beneficios del proyecto de grado es la posible disminución en el tiempo del proceso de decisión sobre la implementación de un proyecto de redistribución de planta, al ofrecer a la persona encargada de la elaboración del rediseño, una metodología que lo valore económicamente, y cuando éste sea viable proponerlo a los directivos para ser sometido a otro tipo de evaluaciones.

Impacto académico: El proyecto contribuye en la creación de conocimiento sobre cómo evaluar económicamente un proyecto de redistribución de planta, proporcionando a los estudiantes una guía para evaluar las propuestas que realicen, además se provee una base para futuras investigaciones y un punto de comparación para evaluar otro tipo de proyectos de inversión.

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Estudiando los algoritmos de redistribución de planta existentes, resulta evidente que las consideraciones hechas para el mejoramiento y reorganización de una distribución de planta sólo se basan en el costo de manejo de materiales (MHC) y costos de reorganización. Lo anterior no puede verse como una evaluación económica del proyecto de redistribución y mucho menos usarse como soporte de la viabilidad económica del mismo. No se consideran riesgos del proyecto ni gastos en los que se deberá incurrir en el desarrollo de la reorganización. Lo anterior genera la necesidad de evaluar económicamente cada proyecto de redistribución de planta propuesto, con el fin de tener una mejor visibilidad sobre los retornos y egresos durante el horizonte de planeación.

El trabajo indicará la manera de transformar la información de un proyecto de redistribución de planta en los datos de entrada de los métodos de evaluación económica. Lo anterior previene que la información del proyecto sea tergiversada o ignorada al momento de evaluarlo económicamente.

⁸ JITHAVECH, Id. Facility layout design considering risk for single-period and multiple-period cases. Tesis de Doctorado en Filosofía. Kansas: Wichita State University, 2008. 7 p.

El mercado global que conforma el entorno de todas las organizaciones cada vez es más volátil e impredecible presentando cambios inmediatos de magnitudes considerables. No considerar el riesgo que lo anterior presenta generará un error en la proyección de los resultados que tendrá un impacto cada vez mayor sobre la brecha entre los resultados esperados y los que genere la implementación del proyecto.

La industria colombiana se caracteriza por ser, en su mayoría, conformada por micro-empresas y PYMES (Pequeñas y Medianas Empresas) al representar el 81,8% del empleo formal en el país (de acuerdo a cifras del DANE 2005). Al ser empresas de patrimonio y operaciones limitados, es difícil que cuenten con los recursos para evaluar económicamente, y de manera precisa, los proyectos de redistribución de planta que surjan, ya que se debe empezar de cero cada vez. Una guía que cumpla esta tarea facilitará la evaluación económica de los proyectos generando una mayor aplicación de ésta.

1.3 DELIMITACIÓN Y ALCANCE

El proyecto será desarrollado para el sector empresarial de la ciudad de Cali y, por lo tanto, contará con limitaciones y características del entorno. La metodología desarrollada podrá pasar por alto características especiales de otros sistemas productivos o hacer suposiciones que no se adapten a los mismos. Como consecuencia, no se harán suposiciones sobre su funcionalidad por fuera del entorno objetivo; aunque no se han evidenciado tales incompatibilidades.

Sumado a esto, cabe resaltar que el estudio que dio peso al impacto del proyecto, se llevó a cabo dentro del mismo entorno descrito. Aunque se pudo evidenciar una falta de desarrollo teórico sobre redistribución a nivel global, no fueron revisadas propuestas de proyectos de este tipo por fuera de Cali por lo que resultaría falaz extrapolar el impacto esperado a nivel local a un nivel más general.

Sobre el proyecto como tal, cabe realizar algunas aclaraciones sobre su función y su alcance para generar expectativas medibles y alcanzables durante su desarrollo.

La primera aclaración debe hacerse para delimitar la etapa del proceso de redistribución de planta sobre la que el proyecto pretende incidir. No es objeto de este trabajo el proponer mejoras sobre una redistribución actual, de hecho, la propuesta de mejora se pedirá como información de entrada para el estudio de factibilidad que es el propósito que se va a cumplir. Es decir, la guía desarrollada no servirá para identificar el proyecto más beneficioso, sólo evaluará una propuesta ya estructurada para dar un criterio de decisión económico proyectando sus costos y beneficios.

Después, cabe comentar que el proyecto no propondrá un método de evaluación económica diferente a los existentes. Se concentrará en guiar la correcta construcción de la información de entrada necesaria, la correcta aplicación de los métodos seleccionados y por último, la interpretación y análisis de los resultados.

En conclusión, se construirá una metodología para recolectar parámetros básicos de un proyecto de redistribución de planta, darles un tratamiento específico para su transformación en flujos de caja, aplicar los métodos seleccionados e indicar la correcta interpretación de los resultados generando un indicador económico sobre el cual basar la decisión de la implementación.

Adicionalmente, la calidad del estudio de factibilidad realizado a través de la metodología a desarrollar dependerá en gran parte de la generación de la información de entrada. La metodología proporcionará lineamientos para hacerlo correctamente pero lo anterior representa una limitación importante a la funcionalidad y efectividad de la misma.

Por último, es importante señalar que cualquier estudio de factibilidad, por más completo que sea su método, sólo genera una visión de sus retornos basándose en ciertos supuestos. El cumplimiento o no de las proyecciones depende del cumplimiento de los supuestos. Esto genera que sea deseable plantear un escenario más pesimista que optimista para así, considerar la viabilidad del proyecto sin sobrevalorar sus retornos u subvalorar sus costos.

1.3.1 Tiempo

El desarrollo del presente proyecto tendrá como marco de tiempo un periodo de 10 meses en los cuales se cumplirán los objetivos planteados y se generará la documentación de los resultados.

1.3.2 Espacio

El proyecto se llevará a cabo en la ciudad de Cali, Colombia, Sur América y se tomarán en cuenta las características de este entorno. Hasta el momento no se han identificado particularidades que eviten que la guía pueda ser extrapolada a un nivel más genérico pero sólo se garantizará su funcionalidad en el entorno en que se desarrolló.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir a que las empresas logren proyecciones confiables de los rendimientos de proyectos de redistribución de planta.

2.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

Desarrollar una metodología para evaluar económicamente un proyecto de redistribución de planta.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar un conjunto de métodos de ingeniería económica que sean compatibles con las características de los proyectos de redistribución de planta.
2. Identificar los costos que genera un proyecto de redistribución de planta a lo largo del horizonte de planeación.
3. Identificar los beneficios económicos que genera un proyecto de redistribución de planta a lo largo del horizonte de planeación.
4. Desarrollar una metodología que adapte cada método de ingeniería económica seleccionado a las condiciones específicas de los proyectos de redistribución de planta.

3 METODOLOGÍA

3.1 Seleccionar un conjunto de métodos de ingeniería económica que sean compatibles con las características de los proyectos de redistribución de planta.

Los métodos de ingeniería económica realizan una evaluación económica de proyectos de ingeniería o inversiones reales, para esto se valen de diferentes supuestos con el fin de simplificar los cálculos. Se evidencia una evolución en estos métodos cuando relajan supuestos considerados anteriormente haciendo que las proyecciones se acerquen más a la realidad. Entonces se seleccionarán aquellos métodos que relajen supuestos que, según las características específicas de los proyectos de redistribución de planta, resulten incongruentes.

Estos son los pasos que se llevarán a cabo:

- i. Identificar las condiciones de operación de un proyecto de redistribución de planta en Cali.
- ii. Conocer los supuestos considerados por los diferentes métodos de ingeniería económica.
- iii. Seleccionar los métodos de ingeniería económica que relajen los supuestos que ignoren las condiciones identificadas.
- iv. Profundizar sobre los métodos seleccionados.

3.2 Identificar los costos que genera un proyecto de redistribución de planta a lo largo del horizonte de planeación.

En esta etapa se identificarán los costos de un proyecto de redistribución de planta y la manera de cuantificarlos. Esto se hace con el propósito incluirlos en los flujos de caja que serán la entrada para los métodos de ingeniería económica seleccionados.

Estos son los pasos que se llevarán a cabo:

- i. Desarrollar una lista de los costos típicos de proyectos de redistribución de planta.
- ii. Determinar la manera de cuantificar cada uno de los costos listados. Su estimación se abordará siguiendo diferentes herramientas y técnicas como el juicio de expertos, estimación análoga, estimación paramétrica o estimación por tres valores, entre otras.

3.3 Identificar los beneficios económicos que genera un proyecto de redistribución de planta a lo largo del horizonte de planeación.

En este objetivo la intención es encontrar los beneficios que retornará el proyecto a lo largo de su vida económica para justificar la inversión inicial. Estos beneficios son generados por ahorros en costos operacionales y aumentos en ingresos.

Estos son los pasos que se llevarán a cabo:

- i. Identificar los ingresos, costos y gastos afectados por un cambio en la distribución de planta.
- ii. Soportándose en la teoría existente en libros, determinar la manera de cuantificar cada uno de los costos, gasto e ingresos identificados.
- iii. Formular una ecuación de beneficios económicos en función de los costos, gastos e ingresos de cada periodo de la vida económica del proyecto.

3.4 Desarrollar una metodología que adapte cada método de ingeniería económica seleccionado a las condiciones específicas de los proyectos de redistribución de planta.

El presente objetivo pretende estructurar el proceso de evaluación económica de proyectos de redistribución de planta mediante la aplicación de los métodos seleccionados. Esto facilitará la ejecución de dicho proceso proporcionando al planeador una herramienta para estudiar la factibilidad de su propuesta.

Estos son los pasos que se llevarán a cabo:

- i. Definir las entradas de información necesarias para cada uno de los métodos de evaluación económica seleccionados.
- ii. Definir el tratamiento a aplicar a los datos de entrada con base en el comportamiento de los mismos en la práctica.
- iii. Elaborar una secuencia de pasos para transformar la información de entrada en flujos de caja, según los costos y beneficios identificados, para cada método de evaluación seleccionado.
- iv. Formular los pasos para la aplicación de los métodos seleccionados a los datos de entrada procesados.
- v. Desarrollar una herramienta que solicite los datos de entrada, los procese, y ejecute los métodos de ingeniería económica seleccionados.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 ANTECEDENTES

4.1.1 Métodos de evaluación económica aplicados en trabajos de proyectos de redistribución de planta grado en las universidades de Cali

Se realizó una revisión en las universidades de Cali, para analizar el proceso de evaluación económica aplicado en trabajos de grado de proyectos de redistribución de planta.

La revisión se elaboró en la Universidad Icesi, la Universidad de San Buenaventura, la Universidad Pontificia Javeriana, la Universidad del Valle, la Universidad Santiago de Cali, la Universidad Autónoma de Occidente y en la Universidad Libre.

En cada universidad se buscó los trabajos de grado que presentan propuestas de redistribución de planta por medio de las palabras claves redistribución de planta, rediseño de planta, mejoramiento de planta y distribución de planta. Estos trabajos no se restringieron a proyectos de ingeniería industrial. Se clasificó cada trabajo en 6 categorías según el método de evaluación económica que aplicaban, las categorías son:

- VPN
- TIR
- Periodo de Retorno de la Inversión (PRI)
- Punto de equilibrio
- Relación Beneficio-Costo
- Ninguno (en caso de no realizar ninguna evaluación económica)

Se elaboró una tabla Métodos de evaluación aplicados en los trabajos de grado de proyectos de redistribución de planta en las universidades de Cali (Ver anexo A) y se consolidaron los datos en la tabla 1. Frecuencia de los métodos aplicados en los trabajos de grado de proyectos de redistribución de planta en las universidades de Cali, en la cual se encontró que el 52 % de las propuestas no realizan ningún tipo de evaluación económica, y el 48% restante aplican métodos de evaluación básicos.

Tabla 1. Frecuencia de los métodos aplicados en los trabajos de grado de proyectos de redistribución de planta en las universidades de Cali.

Método	Frecuencia	Porcentaje
No Evaluación	33.00	52%
Vpn	15.00	24%
Tir	7.00	11%
Pri	2.00	3%
Punto de equilibrio	1.00	2%
Relación Beneficio-Costo	14.00	22%
total	63.00	

Fuente: Los autores

Figura 1 Métodos de evaluación económica aplicados en los trabajos de grado de proyectos de redistribución de planta en las universidades de Cali.



Fuente: Los autores

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Distribución de planta

La distribución de planta es la ordenación física de los equipos, oficinas, departamentos y otros recursos de la organización⁹. Esta ordenación incluye el diseño de los espacios necesarios para el movimiento del material, almacenamiento y todas las demás actividades y servicios de apoyo. La decisión de distribución de planta comprende el determinar la ubicación de los departamentos, de las estaciones de trabajo, de las máquinas y de los puntos de almacenamiento de una instalación¹⁰. El proceso de determinar la mejor organización física del sistema de producción se define como el problema de distribución de planta o FLP (*facility layout problem*).

Una buena distribución es definida por el correcto equipo, el correcto método, el correcto lugar, un proceso efectivo, la distancia más corta y el tiempo más corto.

Cuando las empresas planean la distribución de planta, se deben enfrentar a 4 principales problemas, descritos en la figura 2.

Figura 2. Problemas a resolver con la distribución en planta

PROBLEMAS A RESOLVER CON LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA
<ul style="list-style-type: none">- Diseño de una nueva planta.- Expansión o traslado de una planta ya existente.- Adaptaciones,- Ajustes en distribuciones ya existentes.

Fuente: ACERO PALACIOS, Luis Carlos. Ingeniería de Métodos, movimientos y tiempos. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2009. 132 p.

El FLP se puede clasificar en dos categorías según la cantidad de periodos que se consideren, el problema de distribución de planta estático SFLP (*Static Facility Layout Problem*) y el problema de distribución de planta dinámico DFLP (*Dynamic Facility Layout Problem*).

⁹ ARMSTRONG, Michael. A Handbook of Management Techniques. A Comprehensive guide to achieving managerial excellence & improved decision making. 3 ed. 2006. 185 p.

¹⁰ ALQUILANO, Chase Jacobs. Administración de la Producción y Operaciones; 10 ed. MC. Graw Hill, 2005. 374 p.

4.2.1.1 SFLP

El problema de distribución de planta es la asignación de la ubicación de los departamentos de una planta que minimice el costo de manejo de materiales. Si la asignación se realiza como si el diseño fuera mantenerse sin cambios en el horizonte de planeación, se conoce como el problema de distribución estático SFLP

4.2.1.2 DFLP

El problema de distribución de planta dinámico es la generalización del SFLP. La función objetivo del DFLP es minimizar el costo total durante el horizonte de planeación. El costo total se compone del costo de manejo de materiales y el costo de reubicación de los departamentos.

Los cambios constantes en el mercado están forzando a las compañías a rediseñar sus plantas. Cuando los productos son rediseñados o el portafolio de productos se cambia dramáticamente, el costo de manejo de material es afectado, y el rediseño de planta generará grandes ahorros.

4.2.1.3 Planeación de Instalaciones

Las instalaciones son edificios donde hombres, material y maquinas interactúan para cumplir un determinado objetivo. Generalmente para producir un producto o para proveer un servicio. Es importante que las instalaciones sean administradas adecuadamente para que se cumpla el propósito determinado de manera que múltiples objetivos sean satisfechos, por ejemplo costos bajos, alta calidad, uso reducido de recursos naturales, etc.¹¹ .

La planeación de instalaciones tiene como objetivo ayudar a una organización a alcanzar la excelencia en su cadena de suministro.

Los objetivos específicos de la planeación de instalaciones son:

1. Mejorar la satisfacción del cliente al facilitar sus transacciones, cumplir las promesas hechas a éste y responder a sus necesidades.
2. Aumentar el retorno sobre los activos (ROA) al maximizar las vueltas del inventario, minimizar el inventario obsoleto, maximizar la participación de los empleados, y maximizar el mejoramiento continuo.
3. Maximizar la velocidad para una rápida respuesta al cliente.
4. Reducir los costos y aumentar la rentabilidad de la cadena de suministro.

¹¹ SUNDERESH, Heragu. Facilities Desing. 2 ed. 2006. 3 p.

5. Integrar la cadena de suministro mediante asociaciones y comunicación.
6. Apoyar la visión de la organización a través del mejoramiento del manejo de materiales, el control de materiales y de un buen mantenimiento.
7. Utilizar con eficacia al personal, el equipo, el espacio y la energía.
8. Maximizar el retorno de la inversión (ROI) en todos los gastos de capital.
9. Ser adaptable y promover la facilidad de mantenimiento.
10. Ofrecer a los empleados seguridad y satisfacción en el empleo.

Una planeación de instalaciones eficaz puede reducir los costos de manejo de materiales entre 10 y 30%. Considerando que los costos de manejo de materiales dentro de una organización representan entre 20 y 50% de los gastos totales de operación, una planeación de instalaciones eficaz tiene un impacto significativo en los costos totales de las organizaciones.

Tompkins and White¹² describen el proceso de planeación de instalaciones en las siguientes etapas.

- Definir el problema: Se debe definir el objetivo de la instalación especificando las necesidades, en cuanto, a cantidad de los productos o servicios, volúmenes y niveles de actividad de la nueva instalación o de la mejora de la instalación existente. También se debe especificar las actividades principales y de apoyo que se realizarán en la instalación.
- Analizar el problema: Definir las relaciones entre las diferentes actividades de manera cuantitativa y cualitativa.
- Determinar los requerimientos de espacio para todas las actividades: Considerar requerimientos de equipo, material y personal para determinar la disposición, la estructura y el sistema de manejo de materiales. Se deben generar varios diseños.
- Evaluar las alternativas: Según los criterios seleccionados clasificar las alternativas, además someterlas a juicios subjetivos y evaluar el desempeño de éstas.
- Seleccionar el diseño más apropiado: se debe elegir la alternativa más idónea para cumplir los objetivos de la instalación. Con frecuencia el costo no es el principal criterio de selección.
- Implementación del diseño: esta etapa consta de 3 pasos, el primero es planear y supervisar la implementación del plan seleccionado. El segundo paso consiste en mantener, adoptar y actualizar el plan de la instalación

¹² TOMPKINS y WHITE. Op. cit., p. 13

teniendo en cuenta los nuevos requerimientos a la instalación. Por último redefinir el objetivo de la instalación identificando modificaciones potenciales y expansiones.

4.2.1.4 Ventajas de una buena distribución de planta

Según Phillips ¹³ una distribución de planta tiene efectos significativos en las 4 medidas principales de las salidas del proceso de producción (calidad, cantidad, tiempo y precio) ofreciendo un ambiente para una producción eficiente. A continuación se describe un ejemplo de cómo se mejoran éstas medidas.

La calidad se puede mejorar formando celdas de manufactura, estas instalaciones enfocadas en los productos tienden a tener resultados de alta calidad comparado con otros diseños.

La cantidad y el tiempo precisos se pueden lograr con celdas de manufactura que reduzcan el tiempo de ciclo de los productos.

Para mantener el precio del producto bajo se necesita constantemente minimizar los gastos generales y los costos de fabricación. Los principales elementos de los costos directos e indirectos son el costo de manejo de materiales y el diseño de la instalación, los cuales se disminuir mejorando la ubicación de los equipos, la coordinación de las actividades de manejo de materiales y reduciendo las distancias interdepartamentales.

Además de los beneficios cuantitativos anteriormente mencionados existe una diversidad de ventajas cualitativas de tener una buena distribución de planta, algunas de ellas son:

- Reducción de los riesgos de enfermedades profesionales y de accidentes de trabajo.
- Mejoramiento de la moral y satisfacción del trabajador.
- Reducción del número de retrasos.
- Ahorro de espacio.
- Mejor utilización de la maquinaria, la mano de obra y los servicios.
- Reducción del material en proceso.
- Mejor vigilancia y más fácil.
- Menor congestionamiento.
- Reducción del riesgo de deterioro del material

¹³ PHILLIPS, Edward. Manufacturing Plant Layout, Fundamentals and fine points of optimum facility design. SME. 1997. 43 p.

- Se facilita el ajuste de la planta al variar las condiciones del entorno.
- Se facilita el mantenimiento del equipo.
- Buen aspecto de las zonas de trabajo.
- Buenas condiciones sanitarias.

Una distribución ineficiente resulta en congestiones, en excesivos costos de manejo de materiales y en la ausencia de los beneficios anteriormente mencionados.

4.2.1.5 Manejo de materiales

Manejo de materiales: Es el arte y la ciencia de mover, guardar, proteger y controlar el material. Se encarga de proporcionar la cantidad correcta del material correcto, en el lugar correcto, en la posición correcta, en la secuencia correcta, y mediante el método y costo correctos.

Los objetivos del manejo de materiales son:

1. Incrementar la eficiencia del flujo de materiales
2. Reducir el costo de manejo de materiales
3. Mejorar la utilización de la planta
4. Proveer condiciones de trabajo seguras
5. Incrementar la productividad

El manejo de materiales generalmente representa el 87% del tiempo de producción, el 25% de los empleados, el 55% del espacio de la fábrica y entre el 15% y el 70% del costo total del producto terminado.

4.2.1.6 Unidad de carga

Es un elemento o conjunto de elementos o material a granel, el cual es organizado, para que la carga pueda ser almacenada, y movida como una sola masa. Las unidades de carga más utilizadas alrededor del mundo son la estiba y el container.

La unidad de carga define el equipo de manejo de materiales, la cantidad de material por movimiento y la frecuencia de los flujos.

Un mismo elemento o material se puede manejar por medio de diferentes unidades de carga dentro de una misma empresa, imponiendo restricciones, en cuanto, al equipo de manejo de materiales y espacio requerido. Por consiguiente el tipo de la unidad de carga tiene un alto impacto en los costos de manejo de

materiales y el diseño de ésta es ampliamente estudiado con el objetivo de minimizar los costos de operación de las empresas.

4.2.1.7 Flujo de materiales

El flujo depende de los tamaños de lotes, los tamaños de la unidad de carga, el equipo de manejo de materiales, la disposición y la configuración del edificio.

Un flujo efectivo se logra maximizando los flujos con rutas directas, es decir, que la ruta sea interrumpida desde el origen hasta el destino.

4.2.1.8 Patrones de flujo

Los patrones de flujo se pueden clasificar en los flujos dentro de las estaciones de trabajo, flujos dentro de las estaciones de trabajo y flujos interdepartamentales. Generalmente los flujos interdepartamentales son un criterio usado para valorar el flujo de materiales de la planta, pues son los que representan la mayor cantidad de flujos.

El flujo de materiales eficaz dentro de una planta se caracteriza por tener movimientos progresivos, es decir, movimientos sin interrumpidos.

Los principios para lograr un flujo eficaz son maximizar las trayectorias dirigidas, minimizar el flujo y minimizar el costo del flujo.

Para minimizar el costo del flujo de materiales existen dos alternativas:

1. Minimizar el manejo manual al reducir el desplazamiento, las distancias de viaje manual y los movimientos.
2. Eliminar el manejo manual al mecanizar o automatizar el flujo para permitir que los trabajadores dediquen todo su tiempo a las tareas asignadas.

4.2.1.9 Medición del flujo

Los flujos se pueden medir de dos formas cuantitativamente y cualitativamente.
Medición cualitativa

Las medidas cualitativas abarcan desde la necesidad absoluta de que dos departamentos estén cercanos entre sí, hasta la preferencia de que estén separados. En plantas donde los flujos de materiales son bajos, pero la

información e interrelaciones organizacionales son significativas, las medidas cualitativas son la base para el análisis de los flujos.

Para desarrollar esta medición se usa una tabla de relaciones por adyacencias (Rel Chart), en la cual se indica cada departamento que tipo de relación tiene con los demás departamentos, generalmente para definir el tipo de relación se usa la siguiente clasificación.

- A: Absolutamente necesaria
- E: Muy Importante
- I: Importante
- O: Cercanía Normal
- U: No es importante
- X: No es conveniente

A cada categoría se le asigna un valor, normalmente a la categoría X se le asigna el valor negativo del valor de A. El puntaje de la distribución basado en las adyacencias es:

Ecuación 1 Puntaje basado en adyacencias

$$\sum_i \sum_j x_{ij} r_{ij}$$

Donde:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si los departamentos son adyacentes} \\ 0 & \text{si los departamentos no son adyacentes} \end{cases}$$

r_{ij} : es el valor asignado a la relación entre los departamento i , j .

La medición cuantitativa de los flujos se mide en términos de la cantidad de materiales transportados entre los diferentes departamento. La tabla más usada para este fin es la tabla origen-destino también llamada desde-hacia, la cual representa el flujo de materiales de una empresa por unidad de tiempo. Se puede desarrollar para un turno, un día o según sean las necesidades de la empresa, no obstante una tabla será múltiplo de la otra.

La forma para construir la tabla origen-destino consta de los siguientes pasos:

1. Construir una matriz de $n \times n$, donde n es el número de departamentos

2. Rotular las filas y las columnas según la lista de los departamentos
3. Definir una unidad de medida: se debe escoger una unidad común que represente de manera adecuada todos los flujos, puede ser el número de viajes, el volumen de unidades transportadas, entre otros.
4. Registrar los flujos en la tabla: según las trayectorias de los flujos de materiales en la empresa y la unidad de medida, registrar en la tabla los volúmenes de flujo de un departamento a otro.

Figura 3. Tabla Origen-Destino

Destino Origen	dept.1	dept.2	dept.3	dept.n
dept.1	-	10			
dept.2	15	-	4		21
dept.3		7	-		
⋮				-	
dept.n		18		-	-

Fuente: Los autores

4.2.1.10 Medición de las distancias

Las distancias entre los departamentos de una planta las podemos calcular de dos maneras, euclidiana o rectilínea, y se pueden medir desde los puntos de entrada y salida de los departamentos o desde sus respectivos centroides. Los centroides son un concepto geométrico que se refiere al centro de la figura, es ampliamente usado en los cálculos de las distancias, porque no se necesita saber con exactitud las trayectorias de los flujos.

Las distancias euclidianas se calculan formando una línea recta entre los dos departamentos y normalmente se usan cuando no hay muchos obstáculos entre los departamentos que impidan seguir esta trayectoria.

El cálculo para la distancia euclidiana entre dos departamentos a y b con coordenadas (X_a, Y_a) y (X_b, Y_b) respectivamente, se realiza siguiendo la ecuación de la diagonal entre los dos puntos:

Ecuación 2. Distancia euclidiana

$$D_{ab} = \sqrt{(X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2}$$

Las distancias rectilíneas se usan cuando en las trayectorias entre los departamentos existen obstáculos que impiden el desplazamiento directo por una línea recta entre los mismo, este es el caso más común dentro de una planta, donde los operarios deben trasladarse a través los pasillos. Se calcula sumando las trayectorias en el eje vertical y horizontal, entonces para departamentos a y b con coordenadas (X_a, Y_a) y (X_b, Y_b) respectivamente, la distancia entre ellos es:

Ecuación 3. Distancia rectilínea

$$D_{ab} = |(X_b - X_a)| + |(Y_b - Y_a)|$$

4.2.1.11 Costo de manejo de materiales

Como se ha mencionado el costo de manejo de materiales es un concepto de gran importancia dentro de una empresa, por su alta participación en los costos totales de producción.

Las variables necesarias para calcularlo son la distancia entre departamentos d_{ij} (rectilínea o euclidiana), el flujo entre departamentos f_{ij} (tabla origen destino) y el costo de transportar una unidad de flujo en una unidad de distancia c_{ij} .

Ecuación 4. Costo de manejo de materiales

$$\sum_i \sum_j f_{ij} c_{ij} d_{ij}$$

Para hallar el costo de manejo de materiales de una planta se pueden seguir los siguientes pasos:

1. Desarrollar la tabla de flujos Origen-Destino
2. Calcular las distancias entre los departamentos, completando una tabla similar a la tabla Origen-Destino, pero introduciendo la distancia entre los departamentos en vez de los flujos, generalmente la forma de la tabla es triangular, porque la distancia entre el departamento a y b es la igual a la distancia entre el departamento b y a, pero en algunos casos no sucede esto, por condiciones particulares del sistema, como sentido de flujos a los pasillos.

3. Calcular el costo de transportar una unidad de flujo en una unidad de distancia: este costo depende del equipo de manejo de materiales y del valor de la mano de obra del sector. Se puede realizar una tabla especificando que equipos de manejo de materiales se usan y cuál es el costo de funcionamiento de los mismos, por ejemplo el costo de funcionamiento de un montacargas a gasolina es el costo de la gasolina por unidad de distancia más el costo del tiempo del operario que invierte en realizar ese movimiento. Después se elabora otra tabla especificando cual es el costo de los equipos que son usados para mover cada flujo de material entre los departamentos.
4. Multiplicar las 3 tablas y realizar la sumatoria total.

Estos pasos pueden variar según las condiciones particulares de la planta, por ejemplo que un mismo flujo se pueda realizar con dos equipos distintos.

4.2.2 Redistribución de planta

Desde que los costos indirectos representan una gran proporción de los costos totales de operación, el objetivo del problema de distribución de planta es minimizar costo de manejo de materiales y el costo de reubicar los departamentos. Este tipo específico de problema se define como el problema de redistribución de planta FRLP (*Facilities relayout problem*).

En la actualidad son más comunes los proyectos de redistribución de planta, debido a los cambios en las tecnologías de manufactura, en el diseño del producto, en el proceso de manufactura, en la situación del mercado, en las rutas de producción de los productos, en las regulaciones de seguridad, entre otros. Esta volatilidad del entorno genera que las instalaciones se vuelvan obsoletas y tengan costos de manejo de materiales altos.

Un proyecto de redistribución de planta es un programa de actividades requeridas para mover los departamentos desde las posiciones actuales a nuevas posiciones. El objetivo de un proyecto de redistribución es minimizar el costo de la reubicación de los departamentos y la duración del proyecto. Cuando el proyecto se enfoca en minimizar la duración, muchas máquinas y equipos se deben acomodar en posiciones temporales, incrementando los costos de reubicación. Del mismo modo, cuando el objetivo es minimizar el costo de reubicación, la duración del proyecto se incrementa.

Las actividades requeridas, son aquellas relacionadas con mover los equipos y las maquinas a posiciones temporales, preparar las locaciones para los nuevos departamentos y mover los equipos y maquinas hacia las posiciones finales.

En la práctica es más fácil implementar una distribución de planta en un área vacía y donde las máquinas y equipos serán instalados por primera vez, pero en

los proyectos de redistribución de planta, los departamentos, máquinas y equipos ya están acomodados y es necesario reacomodarlos según el nuevo diseño propuesto, debido a la falta de espacio vacío y a restricciones impuestas por la distribución inicial, los proyectos de redistribución de planta son más difíciles de implementar.

En algunos casos mover e implementar la nueva distribución tiene un costo tan alto, que a pesar de la reducción en el costo del manejo de materiales el proyecto de redistribución no es viable.

El FRLP se puede tratar como un caso especial del DFLP, donde se comienza con una distribución inicial para el primer periodo, y el problema solo consta de 2 periodos de tiempo. Además se deben considerar restricciones adicionales como la redistribución de planta de un área existente, la redistribución de planta con expansión, cambios en las áreas de los departamentos, partes fijas de los departamentos e inclusión de nuevos departamentos.

4.2.3 Proyectos de inversión

Resulta importante caracterizar los proyectos de inversión para así poder identificar los proyectos de redistribución de planta dentro de esta amplia categoría. Será útil identificar las generalidades que presentan en común los dos tipos de proyectos y las particularidades que puedan representar modificaciones en los métodos a aplicar o simplemente, un manejo diferente de los costos del proyecto en su inclusión a la evaluación económica.

Se considerará al proyecto de inversión como una serie de flujos de capital generalmente presentando un flujo negativo en el periodo 0 (inversión inicial) seguido por flujos negativos y/o positivos en los próximos periodos. Contar con la anterior definición beneficia al planeador en tanto conoce exactamente la información que debe pronosticar. Por otro lado, la misma definición limita la evaluación del proyecto a hacerse sólo basada en los flujos de capital proyectados y dejar de lado otras consideraciones. El beneficio de un proyecto de inversión puede ser visto entonces como el valor ganado por una organización al adquirir un activo a largo plazo representado por utilidades incrementadas en el horizonte de planeación.

Una clasificación de los proyectos de inversión puede hacerse según las motivaciones que llevan a su planeación¹⁴:

1. Inversión fundacional

¹⁴ GOTZE, Uwe; NORTHCOTT, Deryl y SCHUSTER, Peter. Investment Appraisal, Methods and Models. Alemania: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 4 p.

2. Inversión actual
 - a. Inversión de remplazo
 - b. Reparaciones mayores o reestructuración general
3. Inversión suplementaria
 - a. Inversión de expansión
 - b. Inversión de cambio (e.g. diversificación, racionalización)
 - c. Inversión de seguridad

Una inversión fundacional es aquella que pretende generar un nuevo negocio. Puede ser la creación de una nueva organización productiva o sólo una nueva rama de una organización existente dedicada a un negocio diferente a los que actualmente se dedica.

La inversión actual cubija las inversiones que se hacen debido a falencias en el sistema productivo actual. Las inversiones de remplazo suelen ser sujeto de ambigüedad debido a la semejanza que presentan con las inversiones de cambio. Un remplazo debe considerarse cuando se hace un cambio que no afectará el estado anterior es decir, si el cambio propuesto genera mejores condiciones como mayor productividad o menores tiempos muertos, se considera una inversión de cambio y no de remplazo.

Por último, las inversiones suplementarias son aquellas destinadas a cambiar las características actuales del sistema productivo. La inversión de expansión se hace para incrementar la capacidad de producción, la inversión de cambio se hace con el propósito de mejorar características del sistema como los costos de producción o la productividad; finalmente, una inversión de seguridad es aquella que pretende reducir la variabilidad del entorno mediante medidas como la compra de materia prima por adelantado o la participación en el negocio de sus proveedores.

Aunque es difícil encajar perfectamente determinado proyecto dentro de alguna de las categorías presentadas, sí es posible relacionarlo mediante la comparación de sus características con las que se definen para cada clasificación.

Uno de los conceptos que será ampliamente utilizado a través del presente trabajo es el de la vida económica de un proyecto de inversión. Se entenderá como tal el tiempo para el cual se planeó el proyecto o el horizonte de planeación. Lo anterior no significa que el proyecto desaparecerá tras pasar dicho periodo, pero sí, que se decidió sobre su viabilidad basándose en las proyecciones de flujos de caja dentro del mismo. Es decir, es posible que el proyecto siga generando utilidades después de la culminación de su vida económica pero éstos no fueron considerados durante el estudio de factibilidad.

4.2.4 Metodologías de evaluación económica para proyectos de inversión

El marco de referencia general del proyecto son los métodos de evaluación económica de valoración de inversión, donde cada uno de estos métodos pueden ser aplicados a proyectos de ingeniería, pero no fueron el objeto principal para la aplicación del método.

Las metodologías para la evaluación económica han sido objeto de desarrollo y estudio debido a que presentan una manera organizada de “predecir” y así, decidir sobre la viabilidad económica de un proyecto de inversión determinado. Mediante la aplicación de matemáticas financieras se puede prever el posible fracaso de un proyecto en específico al comparar la inversión que debe hacerse con los beneficios potenciales que generará. Así, la investigación sobre el tema ha dado origen a una variedad de metodologías que difieren en complejidad, exactitud y aplicación. Cabe resaltar que la exactitud de la simulación depende del ajuste que el tipo de proyecto presente al método aplicado y también a la ejecución del mismo.

En la figura 4 se presenta una clasificación de las metodologías para la evaluación económica de proyectos de inversión presentada en el libro *“Investment Appraisal, Methods and Models”* por los autores Uwe Götze, Deryl Northcott y Peter Schuster como guía estructural de su libro, presentando una evolución de las mismas.

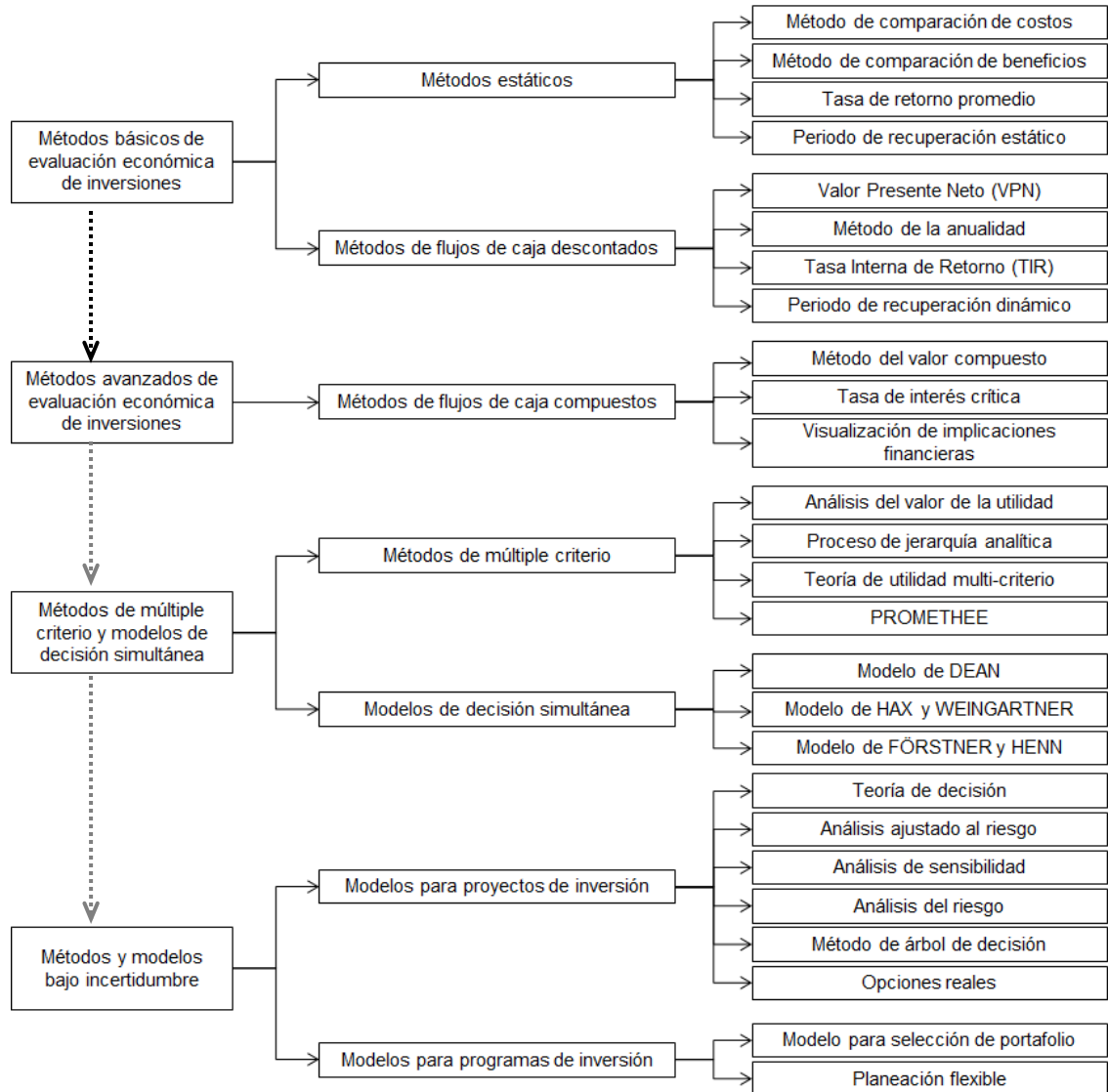
Los métodos y modelos descritos en el texto avanzan en complejidad debido a consideraciones del entorno de cada proyecto lo que hace que la simulación de los rendimientos sea cada vez más ajustada. La primera consideración de este tipo se evidencia al pasar de métodos estáticos a métodos de flujos de caja descontados; aquí se introduce el concepto de valor del dinero en el tiempo que, en los primeros, no se tomaba en cuenta.

La segunda consideración se hace al pasar de métodos básicos de evaluación económica a los métodos avanzados; se elimina la restricción de que la tasa de descuento para los flujos de caja debe ser la misma para todos los periodos y para la totalidad del capital. En la realidad, la tasa de interés varía en el tiempo y según la manera de financiamiento que se haya utilizado; con los métodos avanzados de evaluación económica, o métodos de flujos de caja compuestos, situaciones así se pueden simular.

Una tercera división se hace al identificar la necesidad de perseguir diferentes objetivos con el desarrollo de un proyecto. Existen ocasiones en donde no solo es deseable generar beneficios económicos representados en los flujos de caja sino también, por ejemplo, aumentar la productividad de la planta. Con el fin de decidir sobre proyectos con más de un objetivo, se desarrollaron los métodos de múltiple criterio donde un proyecto no se evalúa sólo basado en los flujos de caja

proyectados, como se hacía en los anteriores, sino que se puede evaluar su rendimiento bajo múltiples criterios.

Figura 4. Clasificación de metodologías de evaluación económica de proyectos de inversión



Fuente: GOTZE, Uwe; NORTHCOTT, Deryl y SCHUSTER, Peter. Investment Appraisal, Methods and Models. Alemania: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008. p 35.

Seguido, nace una nueva categoría de métodos al ser deseable decidir sobre la implementación de varios proyectos de inversión al mismo tiempo. Ya no se quiere comparar entre diferentes opciones de inversión para elegir la más beneficiosa sino que se tienen varias opciones de inversión que no son mutuamente

excluyentes y se tiene una capacidad de inversión. Aquí se necesita una herramienta, no que discrimine entre diferentes proyectos, sino que genere un conjunto entre las mismas donde se evidencie el mejor aprovechamiento posible de la capacidad de inversión. Para cumplir con este propósito, se desarrollaron los modelos de decisión simultánea.

Por último, los autores plantean una nueva categoría en donde los modelos que entran en ella deben tener en cuenta la incertidumbre que representa el medio. Todos los modelos de las categorías anteriores consideran que los valores calculados para variables como flujos de caja, demanda de un producto, costos de materia prima, entre otros; como valores estáticos bajo una certidumbre total. En la práctica, muy pocos entornos productivos funcionan de esta manera debido a la variabilidad de los valores a través del tiempo. Los métodos y modelos bajo incertidumbre presentan una manera de tener en cuenta la naturaleza estocástica, y no determinística, de la mayoría de las variables que juegan dentro de la implementación de un proyecto de inversión.

Una vez presentadas las razones de la clasificación propuesta por los autores mencionados, se procederá a presentar una breve descripción de cada uno de los métodos que aparecen listados. Para el propósito del presente proyecto, se describirán las metodologías de evaluación económica de proyectos de inversión para decidir sobre su ajuste a los proyectos de redistribución de planta específicamente; por lo que los métodos encaminados a evaluar programas de inversión no serán discutidos.

4.2.4.1 Método de comparación de costos

Como el nombre lo indica, este método tiene como valor objetivo el costo del proyecto de inversión. Básicamente asume que los beneficios de cada una de las opciones de inversión mutuamente excluyentes (incluyendo la de no invertir, en caso de ser posible) son iguales y que la diferencia radica sólo en los costos. Se debe calcular entonces el costo promedio de cada proyecto en un periodo determinado (anual, semestral, trimestral, mensual, etc.) y hacer la comparación entre las opciones. El costo total de un proyecto debe estar constituido por gastos de personal, costos de materias primas, depreciación de la inversión, intereses, impuestos, multas y servicios subcontratados. Cabe notar que cada proyecto de inversión cuenta con características diferentes y deben considerarse costos de diferente índole que pueden no encontrarse incluidos en las categorías listadas. Es por esto que la confiabilidad de la predicción hecha por medio de cada método depende tanto de la calidad y veracidad de la información, como de la habilidad de quien lo aplica para generar los datos necesarios e incluir toda la información relevante.

La aplicación del método consiste en el cálculo del costo total de cada opción de inversión, la conversión de los mismos para que se “homologuen” las capacidades, y la comparación de la cifra resultante. Respecto a la conversión, cabe aclarar que es un paso esencial debido a que todas las opciones de inversión no resultan en la misma capacidad de producción. Se debe simular que se van a producir las mismas unidades bajo cada una de las opciones para que el costo total se vea homologado ya que, de lo contrario, seguramente la opción que resulta en mayor capacidad de producción será la que presente un mayor costo pudiendo ser la más económica.

El método de comparación de costos solicita cálculos relativamente simples lo que representa una ventaja clara al momento de tomar decisiones ágiles. Su simpleza es su mayor ventaja y, a la vez, su mayor desventaja. Para la aplicación del método deben hacerse muchas suposiciones y basa su criterio de decisión tan solo en los costos anuales de cada opción dejando de lado otras consideraciones importantes como los ingresos proyectados. Ignorar dichos factores pueden llevar a tomar una decisión desinformada ignorando riesgos en el proyecto escogido y oportunidades en los rechazados.

4.2.4.2 Método de comparación de beneficios

A diferencia del método descrito anteriormente, el de comparación de beneficios tiene en cuenta tanto los costos, como los ingresos de cada periodo para hacer la comparación. Así, se deja de lado la suposición que todas las opciones de inversión generarán el mismo beneficio en el periodo de tiempo definido. También es posible comparar entre inversiones que resulten en diferentes capacidades de producción debido a que, aunque el beneficio y el costo de cada una son generados por diferentes cantidades de producto producido y vendido, sólo se comparará la utilidad proyectada de cada una de las opciones de inversión en un periodo promedio.

La aplicación de este método consiste en el cálculo del costo total de cada opción en un periodo promedio tal como se ejecuta en el método anterior. Se deben también calcular los ingresos proyectados para el mismo periodo con el fin de generar la utilidad proyectada de cada inversión mutuamente excluyente y, sobre ésta, decidir.

El método de comparación de beneficios tiene un espectro de aplicación más amplio que el del método anterior. Al tomar en cuenta los ingresos proyectados y no asumirlos iguales para cada proyecto, es más ajustable a la práctica. Contando sólo con esta diferencia, la comparación de beneficios tampoco demanda una gran dedicación a su aplicación convirtiéndose en una buena herramienta de decisión rápida para discriminar entre opciones de inversión de manera preliminar. Aun así, el método presenta falencias al no considerar factores como el valor del dinero en

el tiempo o al asumir ingresos y costos constantes en todos los periodos de la vida económica del proyecto. Nuevamente se evidencia el poco ajuste que generan dichas suposiciones con la realidad y, aunque ningún método pretende predecir exactamente el valor de las variables en el futuro, existen aproximaciones con mayor ajuste al hacer consideraciones cada vez más ajustadas a la realidad.

4.2.4.5 Tasa de retorno promedio

La tasa de retorno promedio surge de la necesidad de relacionar las utilidades proyectadas de un proyecto con la inversión que debe hacerse para su implementación. Resulta lógico pensar que una gran diferencia en el monto de la inversión debe traducirse en una gran diferencia en las utilidades proyectadas de cada opción de inversión para que éste sea atractivo para el inversionista. Los anteriores métodos no tomaban esto en cuenta y arrojaban resultados que podían parecer confusos a la hora de su decisión. El presente método tiene como resultado un indicador que permite al inversionista observar dicha relación y decidir según esta consideración.

Lo que la metodología hace es generar una tasa de retorno promedio que significa cuantas veces se verá retornada su inversión en un periodo promedio por las utilidades generadas en el mismo. En otras palabras, es una razón de las utilidades promedio de un periodo sobre la porción de inversión destinada para el mismo (*average tie-up*).

Ecuación 5. Average tie-up

$$\text{Average tie - up} = \frac{\text{Monto total de la ecuación}}{\text{Número de periodos promedio en la vida económica del proyecto}}$$

Debido a que este método calcula las utilidades de la misma forma en que lo hace el método de comparación de beneficios, presenta las mismas falencias y fortalezas que el anterior.

4.2.4.6 Periodo de recuperación estático

El periodo de recuperación de un proyecto es el tiempo después del cual la inversión requerida es devuelta al inversionista por los excedentes de flujo de caja que el proyecto generó. El periodo de recuperación estático hace esto asumiendo que todos los periodos en la vida económica del proyecto serán exactamente iguales. El valor objetivo del método es ahora una medida de tiempo después del

cual esperar el retorno de su inversión. Cabe resaltar la importancia de tomar en cuenta sólo los excedentes de flujo de causa resultados del proyecto. Se debe ahincar en esta consideración ya que, de hacerse el calculo con la utilidad operacional, se considerarán flujos de caja que ya existían antes de la implementación del proyecto y se subvaluará el periodo de recuperación.

La aplicación del método consiste en el cálculo de la inversión total requerida (*Capital tie-up*) y dividirlo sobre los excedentes de flujo de caja esperados por la implementación del proyecto. El resultado significará la porción de la vida económica del proyecto después de la cual se generarán beneficios más allá de la inversión.

Las consideraciones hechas para los métodos anteriores aplican para este método ya que conlleva las mismas suposiciones.

4.2.4.7 Valor Presente Neto (VPN)

El valor presente neto de un proyecto refleja la utilidad o pérdida que se generará tras su implementación. Básicamente descuenta a una tasa fija todos los flujos de caja que el proyecto esté encaminado a generar, trayéndolos al momento de la decisión. Es decir, tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo, se compara la inversión que se debe hacer en el día 0 con los flujos de caja que se generarán durante toda la vida económica del proyecto como si éstos se tuvieran en el mismo día 0. Un VPN positivo sugiere que el proyecto analizado es económicamente viable.

Lo primero que se debe hacer para calcular el VPN de un proyecto de inversión es definir o calcular la tasa de descuento del inversionista (tasa a la que se descontarán los futuros flujos de caja para traerlos al presente). Generalmente, se toma como tasa de descuento la tasa de inflación o la tasa “libre de riesgo” a la que tendría acceso el inversionista al no invertir en el proyecto analizado (e.g. CDT).

Acto seguido, es necesario calcular los flujos de caja del proyecto durante toda su vida económica. Es aquí donde entra a jugar la habilidad del planeador para simular los flujos de manera aproximada a la práctica. Entre más organizado sea este proceso, menor es la probabilidad de ignorar riesgos u oportunidades de los proyectos analizados. En este punto ya es posible descontar los flujos de caja para compararlos con la inversión necesaria teniendo en cuenta el valor del dinero en el tiempo.

Ecuación 6. VPN

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^T ((CIF_t - COF_t) * q^{-t}) + L * q^{-T}$$

Donde:

- t = Índice de tiempo (# de periodo)
- T = Fin de la vida económica del proyecto (# total de periodos)
- I₀ = Inversión inicial
- CIF_t = Ingresos del flujo de caja del proyecto para el periodo t
- COF_t = Egresos del flujo de caja del proyecto para el periodo t
- q = (1+i); donde i es la tasa de descuento para el proyecto
- L = Valor de salvamento (o liquidación) del proyecto

Si el VPN se calcula para un solo proyecto, el planeador (o inversionista) debe estimar un valor para el indicador después del cual el proyecto sea atractivo para él (económicamente aceptable). Si, por otro lado, lo que se quiere es comparar entre diversas opciones de inversión mutuamente excluyentes, se deberá comparar el VPN de cada una para decidir sobre su implementación.

El VPN es uno de los métodos más usados para evaluar económicamente proyectos de inversión tanto teóricamente como en la práctica. Su utilidad radica en la facilidad de los cálculos necesarios y en la fácil identificación de la viabilidad económica del proyecto a partir de sus resultados. Por otro lado, para la construcción de los datos de entrada, son necesarios diversos pronósticos. Como se había mencionado anteriormente, la calidad de la evaluación económica depende ampliamente de la habilidad del planeador para construir estos datos. Sin embargo, este reto es común para todos los métodos presentados.

Aunque el VPN presenta una alternativa más realista que los métodos anteriores, se deben hacer algunas suposiciones que pueden cuestionar su ajuste a las situaciones reales. Entre éstas sobresalen que la tasa de descuento sea considerada estática para toda la vida económica del proyecto y que los flujos de caja pueden ser localizados en puntos exactos de tiempo dentro del horizonte de planeación.

4.2.4.8 Método de la anualidad

El método de la anualidad sigue el mismo modelo de flujos de caja descontados que el VPN y, con éste, calcula un flujo de caja fijo que el inversionista puede retirar después de cada periodo de la vida económica del proyecto. Dichos flujos son llamados anualidades (no necesariamente significando que los periodos deban ser años). Se puede deducir que es deseable que un proyecto de inversión presente una anualidad alta.

La anualidad resulta de multiplicar el VPN por el factor de recuperación del capital, que depende de la tasa de descuento del proyecto y de la vida económica del mismo. La relación se puede observar mejor en la ecuación:

Ecuación 7. Anualidad

$$\text{Anualidad} = \text{VPN} * \frac{(1 + i)^T * i}{(1 + i)^T - 1}$$

El cálculo de la anualidad resulta particularmente útil cuando el inversionista desea conocer con anterioridad la disponibilidad de capital que tendrá después de cada periodo de la vida económica del proyecto. Debido a que la ejecución de este método depende del VPN, se pueden hacer las mismas consideraciones sobre su utilidad y exactitud.

4.2.4.9 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno es la tasa que lleva a un VPN de 0 cuando es aplicada como tasa de descuento uniforme. La TIR representa la tasa de interés ganada al implementar el proyecto y recibir los flujos de caja respectivos. El criterio de decisión de este método dicta que un proyecto con una TIR mayor que la tasa de descuento del mismo, es considerado económicamente viable y que es deseable una TIR alta a una baja.

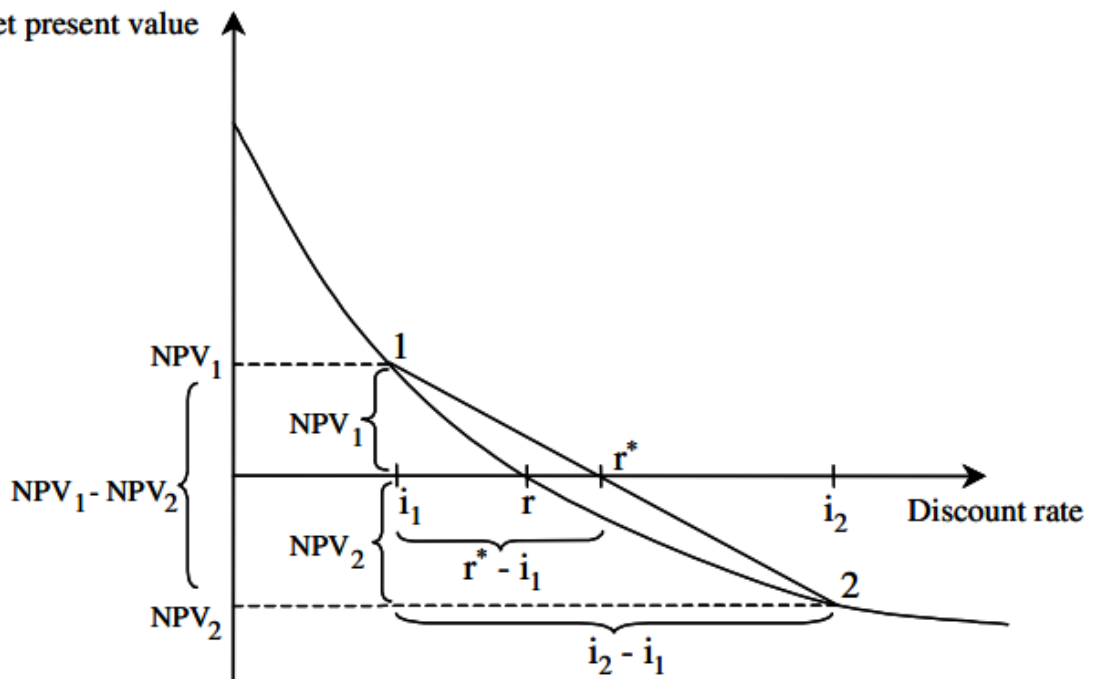
Se definió la tasa interna de retorno como la tasa que lleva a un VPN de 0 cuando es aplicada como tasa de descuento uniforme. Se puede plantear entonces:

Ecuación 8. VPN Igual a cero

$$\text{VPN} = -I_0 + \sum_{t=1}^T ((\text{CIF}_t - \text{COF}_t) * r^{-t}) + L * r^{-T} = 0$$

Donde r es la TIR. Como se puede observar, no es posible despejar r de la ecuación y además, no hay una relación lineal entre el VPN y r. Es por esto que el valor de la TIR debe aproximarse mediante r*.

Figura 5. Interpolación para hallar la TIR



Fuente: GOTZE, Uwe; NORTHCOTT, Deryl y SCHUSTER, Peter. Investment Appraisal, Methods and Models. Alemania: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 71 p.

NPV_1 representa un VPN positivo calculado con una tasa de descuento i_1 seleccionada arbitrariamente.

NPV_2 representa un VPN negativo calculado con una tasa de descuento i_2 seleccionada arbitrariamente.

Mediante una interpolación básica se puede llegar al valor de r^* que, entre más cercanos a 0 sean NPV_1 y NPV_2 , será una buena aproximación de r .

Ecuación 9. TIR

$$r \approx r^* = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} * (i_2 - i_1)$$

Las herramientas tecnológicas logran una muy buena aproximación de la TIR ya que calculan el VPN con una serie de tasas de descuento para así aproximarse a 0 lo más posible. La TIR, al ser análogo al VPN, está sujeta a las mismas consideraciones de aplicación y funcionalidad que este último.

4.2.4.10 Periodo de recuperación dinámico

El método de periodo de recuperación dinámico maneja el mismo concepto que el periodo de recuperación estático solo que tiene en cuenta los flujos de caja descontados, y no estáticos, para la recuperación del capital.

Para su aplicación se deben simular todos los flujos de caja del proyecto en su vida económica. Cada flujo se debe traer al momento de la inversión usando la tasa de descuento del proyecto. Acto seguido, se debe calcular un flujo acumulado que será la suma del flujo de caja del periodo t con todos los flujos de periodos anteriores. El periodo en que el flujo acumulado se vuelva positivo, será definido como t^* . Entonces:

Ecuación 10. Periodo de Recuperación dinámico

$$\text{Periodo de recuperación dinámico} \approx t^* - 1 + \frac{\text{VPN}_{t^*-1}}{\text{VPN}_{t^*-1} - \text{VPN}_{t^*}}$$

Las características de este método son las mismas presentadas por el VPN y el periodo de recuperación estático y, por lo tanto, está sujeto a las mismas consideraciones de funcionalidad que éstos.

4.2.4.11 Método del valor compuesto

El valor compuesto representa la pérdida o ganancia neta resultante del proyecto al final de la vida económica del mismo. Todos los flujos de caja son compuestos (*compounded* o el contrario de descontados) al final de la vida económica del proyecto. La metodología asume que existen dos tasas de interés en el mercado: una tasa de crédito que se ganan los flujos de caja positivos (c) y una tasa de deuda en la que incurren los flujos de caja negativos (d). Se debe entonces calcular el valor compuesto de los flujos de caja de la siguiente manera:

Ecuación 11. Flujos de caja compuestos 1

$$CV_{T^+} = \sum_{t=0}^T \text{FCN}_t * (1 + c)^{T-t}$$

Ecuación 12. Flujo de caja compuestos 2

$$CV_{T^-} = \sum_{t=0}^T \text{FCN}_t * (1 + d)^{T-t}$$

Donde FCN_t es el flujo de caja neto del periodo t. La diferencia entre estas dos cuentas es el valor compuesto del proyecto.

Ecuación 13. Flujo de caja compuestos 3

$$CV_T = CV_{T+} - CV_{T-}$$

El criterio de selección del método plantea que los proyectos con valor compuesto (CV_T) mayor, serán más atractivos para el inversionista.

Aunque el método del valor compuesto requiere exactamente los mismos cálculos que el VPN y por lo tanto presenta su mismo nivel de complejidad, las diferentes suposiciones de cada modelo conllevan diferentes consideraciones. Al asumir diferentes tasas de crédito y de deuda, el método de valor compuesto representa una visión más realista que el VPN. Aun así, el método presenta limitaciones al asumir sólo dos tasas de interés mientras en la práctica se evidencian innumerables opciones de financiamiento e inversión. Tales limitaciones son abordadas por métodos más complejos como el de visualización de implicaciones financieras, explicado en breve.

4.2.4.12 Métodos de múltiples criterios

Para diversas decisiones de inversión, la persona encargada de tomarla tiene como propósito varios objetivos. Entonces estos métodos fueron desarrollados para satisfacer varios criterios simultáneamente, por ejemplo decidir si instalar una planta nueva en una nueva ubicación con una nueva tecnología y/o manufacturar un nuevo producto. Los métodos de múltiples criterios *MCDM* por sus siglas en inglés *multi-criteria decision-making*, se pueden clasificar en dos grupos, los que requieren satisfacer múltiples atributos o los que requieren múltiples objetivos. Los métodos que pertenecen a esta categoría son:

- Análisis del valor de la utilidad
- Proceso de jerarquía analítica
- Teoría de utilidad multi-criterio
- PROMETHEE

4.2.4.13 Métodos de decisión simultanea

A menudo los proyectos de inversión implican decisiones sobre los tipos y el número de proyectos de inversión. Estos se pueden clasificar en modelos estáticos, que consideran un solo periodo (generalmente el principio del periodo de planeación), o modelos dinámicos, que consideran más de un periodo.

Los métodos de decisión simultánea son:

- Modelo DEAN
- Modelo HAX y WEINGARTNER
- Modelo de FORSTER y HENN

4.2.4.14 Métodos bajo incertidumbre

Cuando se enfrenta a la decisión efectuar un proyecto de inversión, se espera lograr resultados positivos del proyecto, bajo condiciones predecibles, es decir, bajo certidumbre, esto se puede realizar sin ambigüedad, pero en realidad las condiciones de una inversión son bajo incertidumbre, lo que dificulta la decisión.

Toda la incertidumbre puede ser causada por el consumidor o el competidor o los empleados, etc. pero toda incertidumbre representa riesgos para el proyecto, el riesgo se puede definir como el daño de tomar una decisión equivocada que impida el logro de los objetivos planteados por el proyecto.

Los métodos que incorporan la incertidumbre y que son adecuados para la decisión de proyectos individuales son:

- Teoría de decisión
- Análisis ajustado al riesgo
- Análisis de sensibilidad
- Análisis del riesgo
- Método de árbol de decisión
- Opciones reales

4.2.4.15 Teoría de decisión

Las reglas de la teoría de decisión son aplicadas cuando existen varias alternativas de proyectos que funcionarán bajo diferentes escenarios. Se analiza entonces el impacto de la incertidumbre sobre los retornos esperados de los diferentes proyectos.

Se elabora una matriz de decisión VPN_{JU} donde se reflejan los diferentes valores presentes de las J alternativas bajo los diferentes U escenarios.

Teniendo el criterio de decisión para todas las alternativas de inversión bajo todos los escenarios contemplados se procede a decidir bajo las siguientes reglas:

1. Reglas de decisión sin estimar probabilidades (no se cuenta con información para estimar la probabilidad de que alguno de los escenarios se dé):

- a. WALD o Maximin: Se decide implementar la alternativa que presente el mayor VPN en el escenario menos favorable. Esta aproximación es generalmente tomada por un inversionista con aversión al riesgo.
 - b. Maximax: Se decide implementar la alternativa que presente el mayor VPN bajo el escenario más favorable. Debido a que se ignora el escenario menos favorable, esta aproximación es tomada por inversionistas optimistas y sin aversión al riesgo.
2. Reglas de decisión estimando probabilidades:
- a. Regla de BAYES: El criterio de decisión es únicamente el valor esperado de cada alternativa, resultado de la suma de los productos del VPN bajo un escenario y la probabilidad de que este suceda.
 - b. Criterio $\mu-\sigma$: Bajo este criterio, se debe tener en cuenta la desviación estándar de los valores presentas así como el valor esperado contemplado en BAYES. La desviación estándar representa el riesgo de alejarse de dicho valor esperado. Teniendo los valores nombrados para las diferentes alternativas, el inversionista deberá decidir sobre la que más se ajuste a sus expectativas.

4.2.4.16 Análisis ajustado al riesgo

Este método ajusta los datos de entrada del método a utilizar para tomar en cuenta el riesgo que se tomará. Se toman medidas como incrementar la tasa de descuento para el VPN o reducir la vida económica del proyecto con el fin de incrementar la probabilidad de que las proyecciones se cumplan.

Aunque el método propone maneras de ajustar ciertos parámetros del proyecto, tan sólo puede ser tomado como una base teórica debido a sus debilidades. Por ejemplo, las correcciones se hacen a parámetros generales y no específicos. Esto impide tomar en cuenta que el riesgo puede ser diferente para diferentes datos. Por ejemplo, la demanda representa un riesgo diferente al que representa el cambio en la TRM. Además, muchos de los factores de corrección se asignan de forma subjetiva por el usuario lo que impide que este método sea considerado como un criterio bueno de selección para proyectos bajo incertidumbre.

4.2.4.17 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad pretende mostrar una relación entre la información dada de un proyecto y sus proyecciones. Trata de evidenciar la manera en que cambia la utilidad proyectada de una inversión a medida que cambian los parámetros que la definieron.

Se aborda el anterior propósito desde dos perspectivas diferentes:

- Análisis tipo A: De qué manera cambia el valor objetivo (VPN, TIR, PRI, etc.) cuando cambian los parámetros.
- Análisis tipo B: Cuáles con los valores de los parámetros que se deben alcanzar para lograr cierto valor deseado en el valor objetivo.

Es posible hacer el análisis de sensibilidad con diferentes datos de entrada o parámetros. Unos de los más comunes son:

- Inversión inicial
- Precio de venta del producto
- Volumen de ventas o de producción
- Costos de venta
- Gastos fijos
- Vida económica del proyecto
- La tasa de descuento

4.2.4.18 Análisis del riesgo

El análisis de riesgo permite introducir las variables sujetas a incertidumbre como distribuciones de probabilidad. Dada la relación de dichas variables con el valor objetivo, se puede derivar una distribución de probabilidad sobre esta última.

Determinada la distribución de probabilidad del valor objetivo de un proyecto, se podrá decidir sobre la viabilidad del mismo o compararlo con otras alternativas.

4.2.4.19 Método de árbol de decisión

Este método utiliza un modelo dinámico que incluye diversos escenarios, sus probabilidades de ocurrencia y las decisiones subsecuentes que se tomarían después de dicha ocurrencia. Debido a la naturaleza de los datos necesarios, es evidente la importancia que tiene el acceso a la información para la veracidad de los resultados que arroje. Deben incluirse en la implementación del método los encargados de las decisiones ya que estas definirán la ruta que tome el proyecto.

Se debe generar un árbol en donde se reflejen, mediante nodos, las diferentes circunstancias y resultados con sus respectivas probabilidades de ocurrencia así como las decisiones que se tomarán dependiendo de estos.

Más que valorar un proyecto, el método de árbol de decisión sirve como guía para intentar lograr el escenario que represente mejores resultados económicos.

4.2.4.20 Opciones reales

Se puede reducir el impacto de la incertidumbre sobre el rendimiento de los proyectos explotando el potencial de adaptarse a sucesos futuros. Contar con información sobre posibles escenarios futuros puede afectar positivamente la capacidad de decisión sobre un proyecto y, por lo tanto, la flexibilidad del mismo. Esto es lo que pretenden las opciones reales.

Una opción real faculta al inversionista a realizar una acción particular sin adquirir una obligación. La compañía ejercerá la opción siempre y cuando sea la que represente mayor valor a futuro. La ejecución de una opción es una acción irreversible y, por tanto, representará la pérdida de la opción como tal.

Las opciones reales pueden aparecer en diferentes formas según la naturaleza de cada proyecto. Algunas de las más comunes identificadas son:

- Opción de esperar
- Opción de cerrar
- Opción de desactivación
- Opción de continuación
- Opciones de extensión o restricción
- Opción de cambio
- Opción de innovación

Además, se han identificado diferentes características de las opciones reales que permiten clasificarlas:

- Opción sencilla vs. Opción compuesta
- Opción exclusiva vs. Opción compartida
- Opción de compra vs. Opción de venta
- Opción americana vs. Opción europea

El objetivo de las opciones es calcular el valor que tiene cada una para poder calcular el valor del proyecto. Se tienen en cuenta diferentes factores para valorar una opción en particular:

- Incertidumbre sobre su realización
- Vida de la opción
- Calidad de la información
- Exclusividad

Las opciones son entonces modeladas mediante el modelo binomial junto con sus probabilidades de realización. De esta manera, se puede valorar el proyecto.

4.2.5 Estimación de Costos de un proyecto

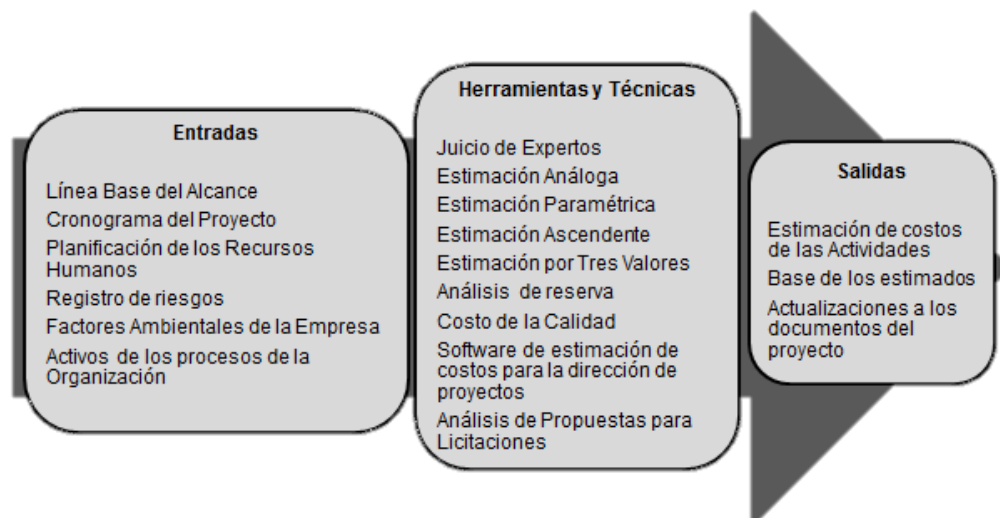
Es el proceso que consiste en desarrollar una aproximación de los recursos económicos necesarios para completar las actividades del proyecto. La sumatoria de los costos de las actividades constituye el presupuesto de costos. En proyectos pequeños, la estimación de costos y la realización del presupuesto de costos las puede hacer una misma persona, pero cada proceso requiere de diferentes técnicas y herramientas.

La aproximación de dichos recursos económicos se estima con base en la información disponible en el momento de planear el proyecto, generalmente los costos se expresan en unidades monetarias, pero en algunos casos se usan otras unidades como horas o los días de trabaja para eliminar las fluctuaciones de las divisas.

El nivel de exactitud de las estimaciones aumenta conforme se dispone de mayor información, por consiguiente a medida que avanza el proyecto las estimaciones serán más exactas.

Algunos de los costos que deben considerarse en un proyecto son los costos del trabajo, de los materiales, del equipo, de los servicios, de las instalaciones, costo por contingencia, estos tipos de costos varían dependiendo del tipo de proyecto. El proceso para la estimación de los costos de un proyecto consiste en 3 pasos, primero unas entradas de información, segundo unas herramientas y técnicas para procesar las entradas de información y por último generar unas salidas.

Figura 6. Proceso de estimación de costos



Fuente: Los autores

4.2.5.1 Entradas

1. Línea base del alcance

Proporciona la descripción del proyecto, los criterios de aceptación, los supuestos y restricciones. Unos de los supuestos que se deben establecer es sí se adjudicarán tanto los costos directos del proyecto como los indirectos, pues los últimos son costos que no se pueden asignar con claridad a un proyecto específico y en ocasiones se distribuyen equitativamente entre los proyectos que los causen. También Es necesario considerar implicaciones contractuales y legales.

2. Cronograma del proyecto

Los recursos de la actividad del cronograma y sus duraciones afectarán la estimación de los costos, donde el presupuesto incluya una asignación para el costo de financiamiento y donde los costos dependan de una unidad de tiempo, por ejemplo el salario de los trabajadores que implementan el proyecto, o el alquiler de maquinaria.

3. Planificación de los recursos humanos

Es necesario conocer los atributos del recurso humano del proyecto, sus salarios y condiciones laborales.

4. Registro de riesgos

Los riesgos tienen un impacto significativo en los costos de un proyecto, por lo que se deben tomar en cuenta los costos de mitigación de riesgos.

5. Factores Ambientales de la Empresa

Los factores que influyen en la estimación de costos son las condiciones del mercado y la información comercial publicada. El primero describe los productos y servicios disponibles, las condiciones generales de la oferta y demanda y las relaciones con otros actores del sector, como proveedores y clientes.

6. Activos de los procesos de la organización

Las políticas de estimación de costos, plantillas de estimación de costos la información histórica hacen parte de los activos de los procesos que influyen en el proceso de estimación de los costos.

4.2.5.2 Herramientas y Técnicas

1. Juicio de expertos

El aporte de expertos es importante, sobre todo cuando existen numerosas variables que afectan la estimación de los costos, y guiado con la información histórica y proyectos similares se puede lograr una estimación aproximada.

2. Estimación análoga

Esta técnica consiste en estimar los parámetros como alcance, costo, presupuesto, duración, tamaño, peso, etc. con base en la información de proyectos similares

Generalmente se usa cuando existe información limitada sobre el proyecto actual. Es una técnica menos costosa que otras, pero así mismo su nivel de exactitud no es tan bueno y depende del grado de similitud de los proyectos a comprar y de la experiencia de los encargados de realizar la comparación.

3. Estimación paramétrica

Consiste en realizar una relación estadística entre los datos históricos y las variables que afectan los parámetros a calcular, como costo, presupuesto y duración. El nivel de exactitud es alto, pero depende de la calidad y cantidad de información disponible y de la bondad del modelo.

4. Estimación Ascendente

Se usa para estimar los componentes del trabajo, consiste en calcular el costo de cada unidad de trabajo o actividad con un alto nivel de detalle, los cuales se van agrupando y resumiendo en niveles superiores.

5. Estimación por tres valores

Consiste en estimar 3 valores considerando la incertidumbre y el riesgo, para definir un valor esperado de los costos.

El más probable (Cm): Se estima Mediante una evaluación realista de los esfuerzos necesarios para completar una actividad.

Optimista (Co): Se estima analizando el mejor escenario para determinada actividad.

Pesimista (Cp): Se estima analizando el peor escenario para determinada actividad.

El valor esperado de los costos (C_e): se determina por medio de un promedio ponderado:

Ecuación 14. Estimación de costos por tres valores

$$C_e = \frac{C_o + 4C_m + C_p}{6}$$

6. Análisis de reserva

En proyectos donde la incertidumbre juega un papel significativo, es importante incluir reservas para contingencias, éstas tienen una relación inversa con los riesgos del proyecto. En algunos casos donde se conoce muy bien el proyecto, las reservas logran eliminarse. El monto de las reservas se puede calcular como un porcentaje del costo estimado, una cantidad fija o utilizando métodos de análisis cuantitativos.

7. Costo de la calidad

Incluye los costos en los que se ha incurrido en inversiones para prevenir el incumplimiento de los requisitos, evaluar la conformidad del producto y reprocesar productos que no cumplan los requisitos. Se deben considerar los supuestos

8. Software de estimación de costos para la dirección de proyectos

Existen programas, hojas de cálculo computarizadas, herramienta de simulación para asistir en el proceso de estimación de costos.

9. Análisis de propuestas para licitaciones

En los casos en los que los proyectos son sometidos a licitaciones se puede solicitar a la empresa licitadora, un informe adicional para que se estimen los costos totales del proyecto

4.2.5.3 Salidas

1. Estimaciones de costos de las actividades

Son evaluaciones cuantitativas de los costos que se requieren para completar el proyecto. Los costos que se deben incluir, entre otros, son el trabajo directo, los materiales, el equipo, los servicios, las instalaciones, la tecnología de la información, inflación y reservas de contingencias. Estas estimaciones se

logran aplicando las técnicas y herramientas mencionadas a la información de entrada.

2. Base de los estimados

Se debe documentar los supuestos aplicados, de forma clara y completa, para la estimación de los costos.

Algunos de los documentos que se pueden incluir son:

- Fundamentos de las estimaciones
- Supuestos utilizados
- Restricciones conocidas
- Indicación del rango de las variaciones de las estimaciones
- Nivel de confiabilidad del estimado

3. Actualización a los documentos del proyecto

Se deben actualizar la información del proyecto a medida que se dispone de mayor cantidad y calidad de la información.

4.2.6 Costos de implementación de un proyecto de redistribución de planta

Para propósitos de este proyecto, el costo de implementación de un proyecto de redistribución de planta se entenderá como la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto propuesto. A continuación se presentarán algunos enfoques encontrados sobre la definición y clasificación de dichos costos.

Hitchings¹⁵ fue el primero en proponer un modelo para la simulación del costo de un proyecto de redistribución de planta. En su artículo llamado “*Control, redundancy and change in layout systems*” identificó cinco costos típicos presentes en la implementación de un proyecto de este tipo:

- a) Costo de fuerza productiva no utilizada durante la implementación de la redistribución.
- b) Costo de mano de obra utilizada en realizar cambios en la distribución de planta.
- c) Costo de equipos utilizados para realizar cambios en la distribución de planta.
- d) Costos generales.
- e) Costos de posibles pérdidas de producción.

¹⁵ HITCHINGS, G. G. Control, Redundancy, and Change In Layout Systems. En: IIE Transactions. Taylor & Francis Group. 1970. Vol.2. p 253-262.

Los tres primeros costos son fácilmente calculables debido a que el proyecto sólo se realiza una vez y en un intervalo de tiempo definido. La categoría de costos generales, además de encerrar diferentes costos fijos del proyecto, es donde los costos específicos de cada proyecto deben ir. La categoría de costos de posibles pérdidas de producción, depende de la habilidad del planeador al identificar los riesgos de incurrir en este tipo de pérdidas tales como el costo del inventario extra a generar para abastecer el periodo de paro de planta o el costo del inventario de trabajo en proceso que se debe guardar o desechar debido a la reestructuración del espacio físico.

Otra aproximación a los costos de un proyecto de cambios físicos a una distribución de planta se hizo en el artículo “*Developing an Effective Strategy to Configure Assembly Systems Using Lean Concepts*” publicado en Diciembre de 2010 en el *International Journal of Lean Thinking*¹⁶. El objeto del proyecto es una propuesta de mejoramiento de las instalaciones productivas aplicando los conceptos de *Lean Manufacturing*. Para ello, se hace una discriminación de los costos que se consideran dentro del modelo de costos y los que no.

Tabla 2. Costos de un proyecto de mejoramiento de instalaciones.

Factores incluidos en el modelo	Factores no incluidos en el modelo
Inversión en equipos	Inventario de trabajo en proceso
Manejo de materiales	Costos de calidad
Energía	Comunicaciones
Potencia neumática	Moral de los empleados
Mantenimiento	Gastos de fallas logísticas
Reorganización de instalaciones	Costos de mala ergonomía
Mano de obra	Flexibilidad
Gastos generales	

Fuente: Los autores

La identificación de los costos del proyecto será de vital importancia para la correcta evaluación económica del mismo. Cabe resaltar que gran parte de la funcionalidad del método depende de la calidad de la información de entrada y ésta, a su vez, depende del grado de detalle y esfuerzo que se preste a este fin. A servir a este propósito, se presentará una propuesta sobre cómo calcular metódicamente cada uno de los costos que sean identificados.

¹⁶ESWARAMOORTHY, M; PRASAD, P.S.S y MOHANRAM, P.V. Developing an Effective Strategy to Configure Assembly Systems Using Lean Concepts. En: International Journal of Lean Thinking. Diciembre, 2010. Vol.1. 17 p.

4.2.7 Ingeniería económica

Éste un de marco de referencia más específico para el proyecto, donde la ingeniería económica ya ha realizado un acercamiento de los métodos de evaluación de proyectos de inversión a proyectos de ingeniería.

Las inversiones pueden ser divididas entre inversiones reales e inversiones financieras. Una inversión financiera es aquella en la cual el inversionista localiza su capital en algún tipo de instrumento financiero como acciones, futuros o bonos. Las inversiones reales, por otro lado, son representadas por activos físicos como una nueva planta o equipos. La redistribución de planta puede ser considerada como una inversión real debido a que es tangible, es decir, el capital del inversionista está destinado a adquirir y/o modificar activos físicos.

“La aplicación de técnicas de análisis económico en la comparación de alternativas de proyectos de ingeniería es nombrada como ingeniería económica.”¹⁷

Los métodos de la ingeniería económica se enfocan en la aplicación de métodos de evaluación económica de proyectos de inversión a proyectos de ingeniería específicamente. La diferencia está en que las metodologías para evaluar económicamente proyectos de inversión están generalmente destinadas a comparar los méritos de dos diferentes alternativas de inversión financiera donde los ingresos y egresos se comportan de maneras muy distintas.

Así, la ingeniería económica no se enfoca tan sólo en la aplicación de las diferentes metodologías a proyectos de ingeniería sino también a describir la correcta extrapolación de los conceptos base de las técnicas de análisis económico al entorno de los proyectos de ingeniería en general.

El texto “*Advanced economic engineering*” de Chan S. Park y Gunter P. Sharp-Bette se dedica a ilustrar al lector sobre los métodos de ingeniería económica existentes a su desarrollo y sobre la manera completa de extraer la información de un proyecto de ingeniería genérico y transformarla en información de entrada para los mismos. Presenta una evolución de la ingeniería económica al mostrar los diferentes supuestos que relaja cada método y sus aplicaciones.

El principal objetivo de la ingeniería económica es analizar el mérito económico que presenta un proyecto de ingeniería. Se trata de la comparación de los flujos de caja del proyecto que serán: La inversión inicial que se debe realizar en el momento 0 y cuyo monto es conocido; y los beneficios proyectados durante la vida

¹⁷ PARK, Chan S. y SHARP-BETTE, Gunter P. “*Advanced Engineering Economics*”. John Wiley and Sons, Inc. 1990. 4 p.

económica del proyecto (fijada como horizonte de planeación) los cuales deberán sobrepasar la inversión inicial, haciendo que el proyecto sea atractivo.

En el caso de los proyectos de ingeniería, los flujos de caja proyectados son sujetos de mucha variabilidad dado su entorno. Muchos factores pueden influir en la realización de dichas proyecciones y por eso, lo mejor que puede hacerse es intentar simular el entorno real y cuantificar el riesgo que cada uno de estos factores implica. Para esto, la ingeniería económica ha pretendido replicar la realidad mediante la relajación de supuestos que significaban una distancia importante entre las proyecciones del método y lo que realmente sucedía.

Escoger los métodos que más se aproximen a las condiciones de operación de un proyecto de redistribución de planta puede lograrse analizando los supuestos que cada uno conlleva. Si estos resultan incongruentes con el entorno en que el proyecto se verá sumido, el método puede obviar aspectos importantes alejando las proyecciones de la realidad. Al relajar este tipo de supuestos, el método logrará proveer al planeador con información más acertada y hará que su decisión sea basada sobre criterios más completos.

4.3 APOORTE CRÍTICO

El presente trabajo pretende brindar una alternativa al planeador de cualquier proyecto de redistribución de planta para estructurar su propuesta con un estudio de factibilidad previo a su presentación. Se piensa cumplir este propósito mediante la elaboración de una guía para la aplicación de métodos de evaluación económica específicamente a proyectos de redistribución de planta. Como se ha señalado antes, no se pretende desarrollar un método nuevo para hacerlo y por eso, el aporte intelectual de este trabajo resulta de la adecuación de la información proveniente de un proyecto de redistribución a los métodos existentes.

Un proyecto de redistribución cuenta con costos y beneficios que no son fácilmente calculables o identificables. Ignorar cualquiera de los dos casos puede resultar en el fracaso del estudio de factibilidad. Los costos, por ejemplo, deben ser identificados totalmente y calculados correctamente para no subvalorar la inversión inicial necesaria y presupuestar un monto que no alcanzará. La subvaloración de los beneficios, por otro lado, podría causar que se ignoraran propuestas con potencial de mejoramiento. Por todo esto, se pensó generar una guía que presentara los costos y beneficios típicos de un proyecto de este tipo reduciendo la probabilidad de que esto suceda.

Adicionalmente, se aplicarán los métodos de evaluación económica más moderno y más completo. Con esto se intenta generar el estudio de factibilidad más acertado posible y brindar al planeador criterios de decisión desde diferentes

perspectivas para que logre dar peso a su propuesta haciéndola atractiva a los inversionistas.

5. ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO

5.1 RECURSOS

Es de esencial importancia para el desarrollo del proyecto “Evaluación económica de proyectos de redistribución de planta” contar con unos recursos tanto humanos como financieros y de trabajo para así, poder completar totalmente los objetivos específicos del mismo, cumpliendo con las actividades que cada uno plantea.

5.1.1 Recursos de trabajo

Se disponen de dos computadoras portátiles con el paquete de Microsoft office equipado y demás programas útiles para el desarrollo del proyecto.

Microsoft Office Word 2010: Este programa será utilizado para la elaboración del documento escrito.

Microsoft Office Excel 2010: Este programa será utilizado para la elaboración de tablas y gráficos, que posteriormente van a ser utilizados para los respectivos análisis necesarios.

Microsoft Project 2010: Este programa será utilizado para la elaboración de todo el cronograma de actividades para el cumplimiento total de los objetivos del proyecto.

Microsoft Visio 2010: Este programa será utilizado para creación de diagramas necesarios para la facilitación de representaciones graficas necesarias para el proyecto.

Material bibliográfico: Recursos como libros, sitios electrónicos, revistas entre otros necesarios para el desarrollo del marco teórico y antecedentes. Se tiene acceso a la biblioteca de la Universidad Icesi y a las bibliotecas que tienen convenio interbibliotecario con ésta, lo que representa una amplia base de información. Además se tiene acceso a diversos de la web que disponen de buen material académico.

5.1.2 Recurso Humano

Tutor metodológico que nos guiará en lo relacionado con la metodología de desarrollo para el planteamiento y posterior desarrollo del proyecto, además en el cumplimiento de las normas Icontec del documento y

Tutor temático que nos proporcionará algunas referencias bibliográficas, experiencia y consejos estratégicos de utilidad para el buen planteamiento y desarrollo del proyecto. También nos brinda la posibilidad tener una consulta con el investigador Luis Felipe Cardona, que nos guiará de una forma profunda en los fundamentos teóricos y en el desarrollo conceptual del proyecto.

Profesores del departamento de Ingeniería Industrial que nos puedan aportar información relevante para el desarrollo del proyecto

5.1.3 Recursos Económicos

Los gastos necesarios para el desarrollo del proyecto serán asumidos por los investigadores. En el momento no se ha identificado gastos de gran monto.

5.2 EQUIPO DE INVESTIGADORES

- Juan Diego Forero Forero, Estudiante de Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi.
- Daniel Cardona Olarte, Estudiante de Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi.
- Luis Felipe Cardona Olarte, Ingeniero Industrial de la Universidad Icesi. Investigador.
- Leonardo Rivera Cadavid, Ingeniero Industrial de la Universidad del Valle, Master of Science in Industrial Engineering (M.S.I.E) de Georgia Institute of Technology, Ph.D in Industrial Engineering de Virginia Polytechnic Institute and State University.

5.3 MATRIZ DE MARCO LÓGICO

La matriz de marco lógico evidencia las actividades que son necesarias para el total cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos, describiendo también los indicadores, los medios de verificación y los supuestos para cada una de las actividades. (Ver anexo B).

5.4 CRONOGRAMA

Para el control del tiempo en el cual se realizarán las actividades se ha establecido un cronograma que se encuentra en el anexo C.

6. DESARROLLO DEL PROYECTO

6.1 SELECCIONAR UN CONJUNTO DE MÉTODOS DE INGENIERÍA ECONÓMICA QUE SEAN COMPATIBLES CON LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PROYECTOS DE REDISTRIBUCIÓN DE PLANTA

6.1.1 Proyecto de redistribución de planta

Un proyecto de redistribución de planta es un programa de actividades requeridas para mejorar el desempeño del sistema, mediante la reorganización de los recursos y equipos desde las posiciones actuales a nuevas posiciones.

Las actividades requeridas, son aquellas relacionadas con mover los equipos y las maquinas a posiciones temporales, preparar las locaciones para los nuevos departamentos y mover los equipos y maquinas hacia las posiciones finales.

6.1.2 ¿Por qué se hace?

Las tendencias recientes en la industria sugieren que las configuraciones de los diseños actuales no cumplen con las necesidades de empresas multi-productos.

Entonces hay la necesidad de una nueva generación de diseños de planta que sean flexibles, modulares y fáciles de reconfigurar.¹⁸

La volatilidad del entorno genera que las instalaciones se vuelvan obsoletas y tengan costos de manejo de materiales altos, esta volatilidad la podemos evidenciar en los siguientes cambios:

- Cambios en las tecnologías de manufactura
- Cambios en el diseño del producto
- Cambios en la mezcla de productos
- Cambios en el proceso de manufactura
- Cambios en el mercado

6.1.3 Fases de un proyecto

Bajo la literatura existente de Project Management (PM) se encuentran resaltadas 5 fases genéricas que surgen en un proyecto. Dado que este campo de estudio ha sido ampliamente explorado y ha sido sujeto de un gran desarrollo, es importante

¹⁸ BENJAFFAR, Saif y otros. "Next Generation Factory Layouts: Research Challenges and Recent Progress" En: Graduate Program in Industrial Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota. 2004.

tomar en cuenta las etapas que aquí se consideran para luego extrapolar dicho concepto a un proyecto de redistribución de planta.

Parece haber un consenso entre los manuales de PM sobre dichas etapas y son las siguientes:

1. **Concepción e iniciación del proyecto:** En esta etapa, la idea del proyecto es analizada para determinar si beneficia o no a la organización. También se juzga si el alcance del proyecto es realista según las condiciones de cada organización.
2. **Definición y planeación del proyecto:** Se debe realizar el plan del proyecto. En esta fase se debe determinar el trabajo a llevar a cabo, su duración, el presupuesto, el cronograma y los recursos necesarios para cada momento de la ejecución.
3. **Lanzamiento y ejecución del proyecto:** Se crean equipos para dividir los recursos disponibles y las responsabilidades. Es importante informar a todo el personal sobre las actividades que se llevarán a cabo y los plazos para hacerlo.
4. **Realización y control del proyecto:** Los supervisores del proyecto comparan el estado real del mismo con el plan inicial (en tiempo y recursos utilizados). Es posible que se deban realizar modificaciones al plan para poder cumplir los objetivos macro.
5. **Cierre del proyecto:** Después de la culminación de todas las actividades del proyecto, el cliente (o en su defecto un interventor) debe recibir y aprobar el producto terminado. Luego, se hace una evaluación con el fin de resaltar las lecciones aprendidas y los logros que se alcanzaron.

Se consideró importante comparar el anterior concepto genérico con lo que podría resultar de un proyecto de redistribución de planta que cuenta con condiciones específicas que pueden diferir de un proyecto de ingeniería en general. Se encontró un desarrollo de una empresa donde se establecen las etapas a llevar a cabo en un proyecto de infraestructura (o de distribución de planta). Los proyectos de redistribución presentan las mismas condiciones y, por lo tanto, se espera que conlleven las mismas fases en su realización.

La Gobernación del estado de Oregon, en la división de instalaciones, establece que las fases de un proyecto de este tipo son las siguientes:

1. **Pre-diseño:** Es un proceso en equipo que se hace entre el gerente del proyecto y los clientes o socios. Se realiza para dar forma a las ideas y generar un proyecto alcanzable y productivo. Se llevan a cabo los siguientes sub-procesos:

- Demostración de la necesidad del proyecto y su alcance
- Definición de requerimientos del proyecto
- Exploración de soluciones de instalaciones alternativas
- Formación de un equipo del proyecto
- Selección del responsable del diseño
- Definición del financiamiento del proyecto

2. Diseño: Se desarrolla el plan final del proyecto en un consenso entre el planeador y el cliente. Se hace con el fin de reunir las expectativas del cliente (en cuanto a alcance y requerimientos) con la propuesta del planeador. Los objetivos son:

- Establecer un contrato con el responsable del diseño
- Llevar a cabo reuniones entre el equipo del proyecto y el diseñador
- Determinar el mejor método para la selección de contratistas
- Revisar el plan final y la estimación de costos y gastos
- Aprobar el diseño y el presupuesto

3. Desarrollo de los documentos de construcción: Después de la aprobación del diseño, se deben desarrollar planos detallados de la construcción así como los requerimientos de equipos para llevarla a cabo. Lo anterior brindará al constructor el nivel de detalle necesario para calcular los costos y desarrollar su oferta. Los objetivos son:

- Preparar los documentos de construcción
- Planear para el periodo de construcción
- Revisar los documentos de construcción

4. Proceso de puja: En este punto los contratistas interesados en la obra presentan sus propuestas para la puja. Se decide según el criterio escogido en la etapa de diseño.

5. Construcción: En la etapa de producción, el equipo del proyecto actúa como interventor supervisando que las actividades planeadas se estén llevando a cabo según el cronograma desarrollado en el plan. Los objetivos son:

- Asistencia en obtener permisos de construcción
- Reacomodación de los ocupantes de la zona (personas, maquinaria o materiales) si es necesario
- Conducir una reunión pre-construcción
- Dar aprobación para el inicio de la construcción
- Monitorear el ajuste a los documentos de construcción
- Mantener informados a los clientes o socios sobre el estado del proyecto
- Solucionar problemas que puedan presentarse

6. Ocupación: Al completarse la fase de construcción, el planeador debe coordinar todas las actividades para ocupar las instalaciones nuevas o mejoradas. Esta etapa incluye las pruebas piloto de funcionamiento del sistema, la adecuación de los ambientes, el montaje del sistema de seguridad y aire acondicionado.

Es posible hallar similitudes y diferencias entre las dos propuestas. En primera medida, las etapas consideradas por la Gobernación de Oregon suponen que todo proyecto de infraestructura debe realizarse por medio de un proceso de licitación (a esto se debe la presencia del proceso de puja como individual) mientras el proceso demarcado por PM supone que el proyecto es llevado a cabo desde el interior de la organización.

Por otra parte, el proceso señalado por PM considera importante llevar a cabo una fase de cierre de actividades donde se puedan identificar los logros alcanzados y las lecciones aprendidas mientras la otra propuesta termina en la ocupación de las instalaciones nuevas o mejoradas.

6.1.4 Fases de un proyecto de redistribución de planta

Después de esta revisión del desarrollo teórico sobre las etapas de un proyecto y, más específicamente, de un proyecto de distribución de planta, se definieron las siguientes etapas como las que dan forma a un proyecto de redistribución de planta. A continuación se nombran y describen las fases que este trabajo considerará para caracterizar el proyecto a evaluar y en las cuales se identificarán los costos relacionados con su implementación.

1. **Pre-diseño:** Esta etapa demarca el proceso por el cual el planeador advierte la oportunidad de mejora y plantea la solución al problema.
2. **Diseño del plan:** Después de evaluar la factibilidad de la solución planteada en el pre-diseño, se genera una propuesta detallada del proyecto a ejecutar y se realiza una evaluación económica de la misma.
3. **Preparación:** Ya aceptado el proyecto, se deben empezar a ejecutar las actividades planeadas para que el proyecto resulte en la menor alteración del sistema como sea posible. En esta etapa generalmente se genera inventario extra o se realiza el empalme con otra planta para que produzca lo que dejará de producir el sistema debido al proyecto.
4. **Realización y control del proyecto:** Inicia en el momento en que se interrumpe el sistema para ejecutar las actividades del proyecto. Generalmente los proyectos de redistribución de planta suponen un paro de producción y este es el momento en que inicia la ejecución del proyecto. Durante esta etapa es que se incurre en la mayoría de los costos del proyecto debido a que es aquí donde se realizan los movimientos y el paro

de producción. La etapa termina al momento de arrancar el sistema nuevamente.

5. **Adaptación:** El nuevo sistema presenta un escenario diferente para los trabajadores por lo que resulta necesario un periodo de entrenamiento y adaptación. De igual manera, tanto el sistema como los procesos y equipos requieren pruebas de calidad para verificar su rendimiento. Esta etapa también consume recursos monetarios y tiempo por lo que es importante tenerla en cuenta aparte de las demás.
6. **Cierre del proyecto:** Al momento en que se comprueba con certeza que el sistema se encuentra trabajando de acuerdo a lo estipulado, se debe dar un proceso de cierre del proyecto donde se evaluará la experiencia y los resultados de la misma para tener una retroalimentación del proceso.

6.1.5 Riesgos de un proyecto

Un proyecto es planeado para funcionar en unas condiciones proyectadas. El riesgo de un proyecto es representado, de manera general, por circunstancias que lleven a que las condiciones reales difieran en gran medida de las condiciones proyectadas y resulte en el incumplimiento de los objetivos perseguidos. Dicho riesgo es ineludible y, por lo tanto, debe ser considerado al momento de evaluar un proyecto de tal forma que este sea lo suficientemente robusto para funcionar bajo los cambios que presente el entorno. También es posible establecer planes de contingencia para grandes cambios brindando una protección aún mayor al proyecto.

Los siguientes riesgos pudieron ser identificados en un proyecto de redistribución de planta a través de una revisión bibliográfica y una serie de consultas con personas formadas en el tema.

Riesgos de la demanda: Son aquellos riesgos que provienen de la interpretación del mercado al momento de realizar las proyecciones de un proyecto. Al momento en que las condiciones de la demanda cambien lo suficiente como para cambiar las condiciones del sistema, las distribuciones pueden tornarse obsoletas presentando desperdicios en el costo de manejo de materiales. Se identificaron los siguientes:

- Riesgo del volumen de las ventas
- Riesgo de la mezcla de producto demandada
- Elasticidad de la demanda al precio

Riesgos del proceso: Son aquellos cambios en las técnicas de manufactura que hacen que los procesos actuales no sean eficientes o hasta se tornen obsoletos. Se identificaron los siguientes:

- Cambios en las tecnologías de manufactura
- Nuevos procesos incluidos en el sistema

Riesgos del producto: Circunstancias que lleven a que los productos a realizar cambien de manera substancial con lo proyectado por el planeador. Se identificaron los siguientes:

- Malinterpretación de la etapa del ciclo de vida en que se encuentran los productos.
- Cambios en el diseño de los productos
- Nuevos productos a fabricar

Riesgos del personal: Inconvenientes con el capital humano de la organización que lleven a que el rendimiento del proyecto no sea el esperado. Se identificaron los siguientes:

- Resistencia al cambio
- Cambio en el costo de la mano de obra

Otros riesgos:

- Volatilidad de la moneda
- Cambios en las condiciones regulatorias o normativas
- Desastres naturales

6.1.5 Tipos

Rodríguez y Vázquez¹⁹ hacen una clasificación de los diferentes tipos de proyectos de redistribución de planta según el motivo por que se ejecuten. Se identifican los siguientes:

- Aumento de capacidad: El sistema productivo permanece inalterado en cuanto a los productos y procesos que se llevan a cabo. El cambio se evidencia en la capacidad instalada de la planta con lo que se afectarán las tasas de producción de los diferentes productos que se procesan.

¹⁹ VÁSQUEZ, Laura y RODRÍGUEZ, María Andrea. Guía para la Realización de Proyectos de Redistribución de Planta en Cali. Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi. Facultad de Ingeniería. 2012.

- Cambio en el sistema productivo: Permite el ingreso de nuevas tecnologías, nuevos procesos, nuevos productos y nuevas etapas a hacer parte del sistema productivo.
- Aumentar eficiencia y reducir costos: El sistema productivo permanece inalterado tanto en capacidad como en características. Se siguen produciendo los mismos productos mediante los mismos procesos con las mismas máquinas. Los cambios son efectuados para mejorar el rendimiento del manejo de materiales dentro de la planta.
- Implementación de algún tipo de filosofía/estrategia empresarial: Este tipo de proyectos responde a la necesidad de modificar el sistema productivo para la aplicación de alguna estrategia o filosofía de producción como *Lean Manufacturing*.

Además de los tipos de proyectos citados, cabe resaltar que cada uno de ellos puede llevarse a cabo de dos maneras en relación con su ejecución en el tiempo.

Instantáneo: éste tipo de proyecto requiere que la planta quede inactiva durante el periodo de tiempo del cambio. Por lo que el objetivo es hacerlo en el menor tiempo posible, y para ello se requiere de la utilización de gran cantidad de recursos.

Ventajas

- Minimiza el tiempo del proyecto
- Se obtienen los beneficios del nuevo diseño tempranamente
- Es fácil realizar intercambios complejos (máquinas grandes, instalaciones eléctricas, modificaciones en infraestructura)
- Mayor seguridad para los trabajadores durante la implementación

Desventajas

- Se debe parar la producción
- Se necesita acumular inventario adicional para suplir la demanda del sistema en ese periodo
- Necesita mano de obra especializada o subcontratar
- Posibles retrasos en las entregas

Por fases: El proyecto se implementa a lo largo de varias etapas donde se reorganizan los diferentes departamentos con el objetivo de minimizar la pérdida de capacidad productiva durante el proyecto y reducir el costo total del proyecto.

Ventajas

- Se puede replantear el proyecto durante la implementación
- Se reduce los inventarios durante el proyecto
- Se disminuye la pérdida de producción

Desventajas

- Los beneficios del nuevo diseño se obtienen gradualmente en un periodo de tiempo prolongado
- Se dificulta realizar algunos cambios de recursos.
- El proyecto se puede prolongar mucho tiempo.

6.1.6 Delimitación del tipo de proyecto

Para objeto de este proyecto, se considerarán únicamente proyectos de redistribución de planta para aumentar la eficiencia y para reducir costos de manera instantánea. Además se limita a cierto tipo de sistemas productivos, que se exponen con detalle en el objetivo 3. Esta delimitación se hace básicamente para simplificar los elementos presentes en el proyecto e incluir los parámetros relevantes para la evaluación económica del mismo. Aquí se presenta una oportunidad de futuras ampliaciones a la metodología desarrollada.

6.1.7 Selección del método de evaluación económica

Se tuvieron en cuenta para esta selección los métodos que se ajustaran al tipo de proyecto delimitado en la sección anterior. Debido a que este tipo de proyectos requiere una inversión en un punto inicial y se espera obtener utilidades en un plazo posterior, se tomaron en cuenta métodos que consideraran el valor del dinero en el tiempo.

Se realizó una revisión de tallada de los métodos de evaluación económica existentes en la literatura, encontrando diferentes estructuras para evaluar los proyectos. A continuación se expone los diferentes métodos de evaluación económica encontrados, y que eran aplicables a el tipo de proyectos específicos que se evalúan en este trabajo, posteriormente se muestra un análisis de las bondades de usar cada uno y con base en este análisis y de la indagación de este tema con expertos, se llega a la elección del método de evaluación a utilizar en este trabajo de grado.

Los métodos de evaluación económica que se consideraron como candidatos para la selección para la metodología a desarrollar son: Valor Presente Neto (VPN), Método de la Anualidad, Tasa Interna de Retorno (TIR), Periodo de Recuperación Dinámico (PRI), Opciones Reales, Teoría de la Utilidad, PROMETHEE, Valor Económico Agregado (EVA). Para evaluar la bondad entre ellos se utilizó un conjunto de criterios que presenta el Ph.D. Gautam Kaul en el curso en línea “*Introduction to Finance*” donde compara diferentes métodos. Los criterios que presenta son: relación costo/beneficio, unidad de medida, punto de referencia obvio, facilidad de comparación, facilidad de comunicación y facilidad de cálculo.

La relación costo/beneficio habla sobre si vale la pena invertir los recursos necesarios para la aplicación del método en comparación con el resultado que genera el método. Dado que la evaluación económica es tan solo un aproximado de los beneficios monetarios que un proyecto podría conllevar bajo cierto escenario, no se justifica una inversión muy intensiva de recursos tales como el tiempo en generar información muy detallada y precisa sobre el proyecto. Este criterio habla sobre este balance que debe haber entre el valor que agrega el resultado del método al planeador del proyecto y la inversión que debe hacer el mismo para generar la información necesaria.

La unidad de medida habla sobre las unidades que tiene el resultado de aplicar cada uno de los métodos. Se refiere al sentido que tienen estas unidades cuando se evaluará un proyecto de inversión mediante la aplicación de dicho método.

Por punto de referencia obvio se refiere a que debe existir un punto en el cual el resultado del método pueda ser identificado como bueno o como malo.

La facilidad de comparación se refiere a qué tan directa es la comparación entre los valores obtenidos por el método de evaluación para proyectos diferentes.

La facilidad de comunicación se refiere a qué tan fácil de entender es el concepto para una persona que no esté familiarizada con el método de evaluación.

Por último, la facilidad de cálculo se refiere a la complejidad que conlleva el método al momento de computarlo.

6.1.7.1 Métodos de Evaluación Económica

Valor Presente Neto (VPN)

El valor presente neto de un proyecto refleja la utilidad o pérdida que se generará tras su implementación. Básicamente descuenta a una tasa fija todos los flujos de caja que el proyecto esté encaminado a generar, trayéndolos al momento de la decisión. Es decir, tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo, se compara la inversión que se debe hacer en el día 0 con los flujos de caja que se generarán

durante toda la vida económica del proyecto como si éstos se tuvieran en el mismo día 0. Un VPN positivo sugiere que el proyecto analizado es económicamente viable.

Lo primero que se debe hacer para calcular el VPN de un proyecto de inversión es definir o calcular la tasa de descuento del inversionista (tasa a la que se descontarán los futuros flujos de caja para traerlos al presente). Generalmente, se toma como tasa de descuento la tasa de inflación o la tasa “libre de riesgo” a la que tendría acceso el inversionista al no invertir en el proyecto analizado (e.g. CDT).

Acto seguido, es necesario calcular los flujos de caja del proyecto durante toda su vida económica. Es aquí donde entra a jugar la habilidad del planeador para simular los flujos de manera aproximada a la práctica. Entre más organizado sea este proceso, menor es la probabilidad de ignorar riesgos u oportunidades de los proyectos analizados. En este punto ya es posible descontar los flujos de caja para compararlos con la inversión necesaria teniendo en cuenta el valor del dinero en el tiempo.

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^T ((CIF_t - COF_t) * q^{-t}) + L * q^{-T}$$

Donde:

- t = Índice de tiempo (# de periodo)
- T = Fin de la vida económica del proyecto (# total de periodos)
- I_0 = Inversión inicial
- CIF_t = Ingresos del flujo de caja del proyecto para el periodo t
- COF_t = Egresos del flujo de caja del proyecto para el periodo t
- $q = (1+i)$; donde i es la tasa de descuento para el proyecto
- L = Valor de salvamento (o liquidación) del proyecto

Si el VPN se calcula para un solo proyecto, el planeador (o inversionista) debe estimar un valor para el indicador después del cual el proyecto sea atractivo para él (económicamente aceptable). Si, por otro lado, lo que se quiere es comparar entre diversas opciones de inversión mutuamente excluyentes, se deberá comparar el VPN de cada una para decidir sobre su implementación.

El VPN es uno de los métodos más usados para evaluar económicamente proyectos de inversión tanto teóricamente como en la práctica. Su utilidad radica en la facilidad de los cálculos necesarios y en la fácil identificación de la viabilidad económica del proyecto a partir de sus resultados. Por otro lado, para la construcción de los datos de entrada, son necesarios diversos pronósticos. Como se había mencionado anteriormente, la calidad de la evaluación económica depende ampliamente de la habilidad del planeador para construir estos datos. Sin embargo, este reto es común para todos los métodos presentados.

Aunque el VPN presenta una alternativa más realista que los métodos anteriores, se deben hacer algunas suposiciones que pueden cuestionar su ajuste a las situaciones reales. Entre éstas sobresalen que la tasa de descuento sea considerada estática para toda la vida económica del proyecto y que los flujos de caja pueden ser localizados en puntos exactos de tiempo dentro del horizonte de planeación.

Método de la anualidad

El método de la anualidad sigue el mismo modelo de flujos de caja descontados que el VPN y, con éste, calcula un flujo de caja fijo que el inversionista puede retirar después de cada periodo de la vida económica del proyecto. Dichos flujos son llamados anualidades (no necesariamente significando que los periodos deban ser años). Se puede deducir que es deseable que un proyecto de inversión presente una anualidad alta.

La anualidad resulta de multiplicar el VPN por el factor de recuperación del capital, que depende de la tasa de descuento del proyecto y de la vida económica del mismo. La relación se puede observar mejor en la ecuación:

$$\text{Anualidad} = \text{VPN} * \frac{(1 + i)^T * i}{(1 + i)^T - 1}$$

El cálculo de la anualidad resulta particularmente útil cuando el inversionista desea conocer con anterioridad la disponibilidad de capital que tendrá después de cada periodo de la vida económica del proyecto. Debido a que la ejecución de este método depende del VPN, se pueden hacer las mismas consideraciones sobre su utilidad y exactitud.

Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno es la tasa que lleva a un VPN de 0 cuando es aplicada como tasa de descuento uniforme. La TIR representa la tasa de interés ganada al implementar el proyecto y recibir los flujos de caja respectivos. El criterio de decisión de este método dicta que un proyecto con una TIR mayor que la tasa de descuento del mismo, es considerado económicamente viable y que es deseable una TIR alta a una baja.

Se definió la tasa interna de retorno como la tasa que lleva a un VPN de 0 cuando es aplicada como tasa de descuento uniforme. Se puede plantear entonces:

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^T ((CIF_t - COF_t) * r^{-t}) + L * r^{-T} = 0$$

Donde r es la TIR. Como se puede observar, no es posible despejar r de la ecuación y además, no hay una relación lineal entre el VPN y r. Es por esto que el valor de la TIR debe aproximarse mediante r*.

Las herramientas tecnológicas logran una muy buena aproximación de la TIR ya que calculan el VPN con una serie de tasas de descuento para así aproximarse a 0 lo más posible. La TIR, al ser análogo al VPN, está sujeta a las mismas consideraciones de aplicación y funcionalidad que este último.

Periodo de recuperación dinámico (PRI)

El método de periodo de recuperación dinámico maneja el mismo concepto que el periodo de recuperación estático solo que tiene en cuenta los flujos de caja descontados, y no estáticos, para la recuperación del capital.

Para su aplicación se deben simular todos los flujos de caja del proyecto en su vida económica. Cada flujo se debe traer al momento de la inversión usando la tasa de descuento del proyecto. Acto seguido, se debe calcular un flujo acumulado que será la suma del flujo de caja del periodo t con todos los flujos de periodos anteriores. El periodo en que el flujo acumulado se vuelva positivo, será definido como t*. Entonces:

$$\text{Periodo de recuperación dinámico} \approx t^* - 1 + \frac{VPN_{t^*-1}}{VPN_{t^*-1} - VPN_{t^*}}$$

Las características de este método son las mismas presentadas por el VPN y el periodo de recuperación estático y, por lo tanto, está sujeto a las mismas consideraciones de funcionalidad que éstos.

DEAN

El modelo DEAN se utiliza para hacer una elección simultánea entre varios proyectos de inversión o financiación en un solo período. Este método es un modelo estático. Estas características limitan la utilidad del modelo como una herramienta de decisión.

Los supuestos en los que se basa este modelo son:

- Existe certeza
- Se disponen de un número limitado de proyectos posibles
- Los proyectos no son mutuamente excluyentes

- Solo los efectos monetarios son relevantes
- Todos los efectos relevantes son asignados a cada proyecto como flujos de caja de entrada o de salida
- La liquidez es un requerimiento para todos los puntos del tiempo de consideración
- Los impuestos no afectan las utilidades de los proyectos
- Se conoce con anticipación la vida económica de los proyectos
- Se puede realizar total o parcialmente un proyecto
- Se considera un solo periodo de tiempo, con flujos de caja al principio y al final de éste.

El objetivo de este modelo es maximizar el valor compuesto del total de la inversión. La principal ventaja de este modelo es la simplicidad de obtener la información y del cálculo, pero debido a los supuestos que considera, se puede aplicar a un número reducido de situaciones y proyectos. Debido a esto no se considera como un método compatible con los proyectos a evaluar.

HAX y WEINGARTNER

Este modelo asume casi los mismos supuestos que el modelo de DEAN, pero HAX y WEINGARTNER consideran múltiples periodos de tiempo, es decir los flujos de caja de entrada y salida pueden ocurrir en periodos entre el principio y final del proyecto. El objetivo se mantiene, siendo maximizar el valor compuesto del total de la inversión. Este modelo también asume que se realiza la inversión en cada proyecto de forma total, pero se puede reinvertir repetidamente cada periodo en los diferentes proyectos, es decir, estas inversiones en los proyectos no se pueden hacer parcialmente.

Este modelo requiere de información más precisa y es más complejo la consecución de la información de ésta. Además el cálculo es muy complejo, por lo que cuando se tienen varios proyectos y varios periodos de tiempo, es necesario llegar a una solución por medio de un heurístico, lo que no asegura la optimización de la solución. Debido a los supuestos y a la dificultad de la recolección de información no se considera como un método compatible con los proyectos a evaluar en este trabajo.

Valor Económico Agregado (EVA)

El EVA es un método que intenta calcular la utilidad económica de una organización al aplicar una medida (o realizar un proyecto de inversión). Esta utilidad económica es definida como el rendimiento extra que genera el proyecto a la compañía, por encima del rendimiento requerido por la misma. El EVA es esencialmente una modificación de la TIR que intenta eliminar las debilidades de

este último método. La TIR de dos proyectos tiene diferentes dificultades para compararse debido a la magnitud y el riesgo de los mismos. El EVA toma en cuenta estas dos consideraciones calculando, en unidades monetarias, el exceso de utilidad que resulta de la TIR de un proyecto sobre el rendimiento esperado. Así, diferentes proyectos se hacen comparables.

El EVA fue concebido como un indicador de gestión para que las organizaciones llevaran cuenta de la manera en que sus proyectos o unidades de negocio generan valor por encima de lo esperado por los planeadores. Es por esto que para su cálculo se debe tener información real de la contabilidad generada en el periodo a evaluar. Esta necesidad es la que, en principio, diferencia este método de los demás métodos de valoración. Si se usan para su cálculo los flujos de caja generados por un proyecto, su resultado no es diferente al que arrojaría el Valor Presente Neto.

PROMETHEE

PROMETHEE es un método de valoración de proyectos de inversión que se concentra en comparar opciones en donde los criterios de selección no son directamente comparables. Para esto se vale de establecer preferencias o prevalencia de cierto criterio sobre los demás para poder comparar los rendimientos de los distintos proyectos de inversión en los diferentes criterios de decisión. En vez de otorgar un orden de magnitud arbitrario a cada criterio, PROMETHEE utiliza una probabilidad π_{ij} que es la probabilidad de que el encargado de la decisión considere el criterio i por lo menos como de igual importancia que el criterio j . A través de un procedimiento algebraico, se llega a una decisión entre cada pareja de alternativas analizadas. El resultado arroja si una opción es preferible que la otra o si no son comparables.

Este método brinda la oportunidad de comparar diferentes alternativas de inversión mediante criterios de decisión no comparables, como lo hacen todos los métodos de múltiples criterios. La medida probabilística que introduce es menos arbitraria que un orden de magnitud y por lo tanto resulta en una manera más imparcial de comparar proyectos. Aun así, el método presenta debilidades en comparación a otros estudiados debido a que la medida de decisión no es una medida absoluta sino relativa. Se muestra qué alternativa de inversión es mejor que las demás pero no brinda información sobre la bondad del proyecto en sí. Además, presenta contradicciones al comparar ciertos proyectos en donde las decisiones no son transitivas. Es decir, es posible que el método arroje que la alternativa 1 es mejor que la 2, que la 2 es mejor que la 3, pero que la 3 es, a su vez, mejor que la 1. Esto sucede gracias a que los puntajes que otorga el método a cada proyecto de inversión son relativos al proyecto con el cual se está comparando y no absolutos.

Opciones Reales (ROA)

Los planeadores de las empresas han usado por largo tiempo los métodos tradicionales como TIR, VPN, etc. Sin embargo no es ampliamente conocido que estos métodos requieren de supuestos de perfecta certidumbre en los flujos de caja de proyectos, es decir que estos son determinísticos, supuestos que en un proyecto de redistribución no se cumplen.

Existen 3 limitaciones importantes de los métodos tradicionales que Opciones Reales (ROA) **supera** en proyectos bajo incertidumbre, primero la selección apropiada de las tasas de descuento tiene problemas, pues todos los flujos de caja futuros se deben descontar con una tasa apropiada que refleje el riesgo que representa la incertidumbre, y estos flujos se suman para calcular el VPN, entonces escoger la tasa de descuento adecuada se dificulta, pues se debe escoger una tasa más alta cuando los proyectos son de alto riesgo, como un premio a asumirlo y viceversa.

Segundo, las metodologías tradicionales ignoran la flexibilidad de modificar decisiones a medida que se obtiene mayor información. Los proyectos de redistribución por fases tienen la opción de modificarse en medio de su implementación, lo que es útil para entender y manejar el riesgo y valorar la flexibilidad asociada al proyecto.

Tercero, las decisiones son generalmente vistas como si se ejercieran ahora o nunca, pero no se tiene en cuenta que las decisiones se pueden retrasar, esperando mayor información o que las condiciones cambien.

Método de la utilidad

El método de la utilidad permite al inversionista incluir metas no financieras dentro de la función objetivo. De esta manera, la meta a alcanzar por el proyecto no se restringe únicamente a los méritos económicos del mismo sino que incluye metas que no son representables en dinero de manera directa. Se podrán incluir metas de rendimiento, productividad, condiciones laborales o cualquier otra que sea motivo de la ejecución de una redistribución de planta. Aunque muchos de estos factores pueden ser traducidos a dinero, dicha transformación representa trabajo y puede ser fuente de errores que causen inexactitud en las predicciones.

Una de las condiciones de operación identificadas para proyectos de redistribución de planta es que las metas perseguidas pueden ser de naturaleza cualitativa. Se plantea cuantificar los factores cualitativos que influyan en un proyecto de este tipo con el fin de incluirlos en los métodos que presentan un análisis puramente financiero, pero el método de la utilidad muestra una manera directa de incluirlos en la evaluación.

6.1.7.2 Análisis de los Métodos de Evaluación

Criterio	Relación Costo/Beneficio	Unidad de Medida	Punto de Referencia	Facilidad de Comparación	Facilidad de Comunicación	Facilidad de Cálculo
VPN	Necesita los flujos de caja proyectados y la tasa de descuento	Flujos de caja futuros descontados (\$)	El 0 es el punto de referencia	Se compara fácilmente (\$ vs. \$)	Muy comprensible	Cálculos básicos
Anualidad	Necesita los flujos de caja proyectados	Flujo de caja anual que generará (\$)	Inexistente	Se compara fácilmente (\$ vs. \$)	Muy comprensible	Cálculos básicos
TIR	Necesita los flujos de caja proyectados	Tasa a la cual el VPN se hace 0 (%)	La tasa de descuento del inversionista	La comparación no es directa	Difícil de comunicar	Búsqueda de valor
PRI	Necesita los flujos de caja proyectados	En cuántos periodos se recuperará la inversión (# de periodos)	Inexistente	Se compara fácilmente (# vs. #)	Muy comprensible	Cálculos básicos
Opciones Reales	Se necesita información detallada del proyecto para establecer las opciones	Flujo de caja esperado descontado (\$)	El 0 es el punto de referencia	Se compara fácilmente (\$ vs. \$)	Concepto confuso	Construcción de árbol de decisión y cálculos básicos
PROMETHEE	Se necesita información sobre las preferencias del planeador sobre los criterios de decisión	Orden de preferencia de las opciones (a veces resultan incongruencias)	Se compara entre las opciones existentes pero no se tiene información sobre la bondad de cada una	Comparación directa entre alternativas de inversión	Difícil de comunicar	Construcción y solución de sistema de ecuaciones
EVA	Necesita los flujos de caja proyectados y la tasa de descuento	Utilidad económica proyectada	El 0 es el punto de referencia	Se compara fácilmente (\$ vs. \$)	Concepto confuso	Cálculos básicos
Método de la Utilidad	Necesita una función de utilidad que represente las preferencias del planeador	Utilidad que representa cada proyecto para el planeador	Inexistente	Comparación directa entre alternativas de inversión	Difícil de comunicar	Definición de función de utilidad
	Muy deseable					
	Deseable					
	Indeseable					

Después de la comparación realizada anteriormente y de consultar con expertos en la materia como Rodrigo Varela Ph.D. y Luis Berggrun Ph.D. se concluyó que el método de evaluación que se debería aplicar en el presente proyecto es el **Valor Presente Neto**. Tanto su simplicidad como su potencia hacen que el VPN sirva como criterio de decisión para una metodología genérica como la que se pretende desarrollar. Su exactitud depende mayormente de la construcción de los flujos de caja proyectados y, por tanto, ese será un fuerte enfoque en los siguientes objetivos.

Consideraciones sobre el método seleccionado

El VPN es un cálculo básico de los flujos descontados de un proyecto de inversión para compararlos con la inversión necesaria. Este método se encuentra explicado en detalle en la sección 4.2.4.7. Aunque es un método básico, es el más utilizado debido a las bondades que presenta para evaluar proyectos de inversión. Aun así, la precisión de este método depende, en gran parte, de la manera en que se generen los datos de entrada para ejecutarlo. Por esto, se señalará una manera estructurada de generar los flujos de caja proyectados para que resulten lo más aproximados posible a la realidad.

Flujo de Caja

Ingresos
(-) Costo de lo vendido
(-) Gastos administrativos y de ventas
(-) Depreciación
<hr/>
Utilidad Operativa
(-) Impuestos
<hr/>
Utilidad neta después de impuestos
(+) Depreciación
(-) Inversión de capital
(-) Incremento en capital de trabajo
<hr/>
Flujo de caja del periodo

Después de un análisis de cada uno de los elementos presentes en el flujo de caja, se concluyó que aquellos que se afectarían tras la aplicación de una redistribución como la definida son el costo de lo vendido y el incremento en el capital de trabajo. Las variaciones en estos dos tendrán impacto en la utilidad operativa, los impuestos, la utilidad neta después de impuestos y el flujo de caja del periodo. Dada la naturaleza de la evaluación económica que se va a realizar, sólo se deben tener en cuenta aquellos elementos del flujo de caja que cambien como resultado del proyecto para elaborar el flujo de caja del mismo. A continuación se hará una breve explicación de los dos elementos considerados:

Costo de lo vendido: Este costo se refiere al costo variable de producir cada unidad de producto vendida. Es calculado como el número de productos vendidos por el costo de producir cada uno de ellos. Se espera que un proyecto de redistribución de planta influya en estos costos unitarios.

Incremento en el capital de trabajo: El capital de trabajo es aquel que debe tenerse invertido para el funcionamiento del negocio. Este capital está representado en su mayoría por los inventarios, las cuentas por pagar y las cuentas por cobrar. Un cambio en este capital de trabajo de un periodo a otro significaría que, o hay que invertir más capital en el funcionamiento del negocio, o que una parte del capital invertido en el negocio quedará libre para invertir en otra cosa. Por esto se incluye este cambio en el flujo de caja. Se espera que un proyecto de redistribución de planta influya en los niveles de inventario necesarios por lo que este elemento del flujo de caja debe tenerse en cuenta.

6.2 IDENTIFICAR LOS COSTOS QUE GENERA UN PROYECTO DE REDISTRIBUCIÓN DE PLANTA A LO LARGO DEL HORIZONTE DE PLANEACIÓN

A continuación se definirán las diferentes maneras encontradas de calcular el costo de reubicar un departamento. Se llegó a una clasificación de éstas, a partir de una revisión bibliográfica de los artículos sobre *DFLP*, la cual se muestra a continuación.

6.2.1 Clasificación de los costos de reorganizar los departamentos

6.2.1.1 Costo Fijo

Un costo fijo es aquel que permanece constante en magnitud independiente de las fluctuaciones en los volúmenes de producción. Para el caso de un proyecto de redistribución de planta, lo anterior supone que el costo de la reorganización de los departamentos no dependerá del número o naturaleza de los movimientos a realizar.

- **Costo Fijo Total**

Este tipo de costo asume que el valor total de reorganizar todos los departamentos es independiente de la cantidad de éstos que se reubiquen. Es decir, se asume un costo general de parar la planta y hacer cualquier movimiento dentro de la misma.

Este costo se incurre cuando la distribución de la planta presenta cualquier variación entre dos periodos consecutivos.²⁰

Este tipo de costos se tiene en cuenta cuando se puede llegar de forma directa a un estimado total del costo de reubicar los departamentos y desagregarlo por cada uno de ellos se vuelve improductivo y además puede ser dispendioso asociar la parte de ese costo que corresponde a un departamento específico.

- **Costo Fijo – Magnitud Constante**

En este caso, se asume que el costo de reubicar cualquier departamento es igual, es decir, no depende del departamento en cuestión o del movimiento que se requiera. Por lo tanto, el costo total del proyecto será el producto del número de departamentos a reubicar por el costo fijo (magnitud constante).

El costo de la reubicación es definido por el costo de hacer cambios a la configuración del espacio así como por el costo de los requerimientos de mano de obra y equipos para instalar, mover, etc.²¹

Este costo se debe usar cuando el costo de mover los departamentos es similar entre ellos y cuantificar esta diferencia pasa a ser irrelevante. Esto sucede cuando los departamentos comparten muchas de sus características, pero en estos proyectos las características de los departamentos pueden variar dependiendo del sector productivo.

- **Costo Fijo – Magnitud Variable**

El costo de reubicar el departamento i depende de la naturaleza del mismo y por lo tanto es diferente entre departamentos.

Se evidenció la existencia de dos maneras de usar este tipo de costo. La primera sólo depende del departamento a mover. Este costo ocurre con cualquier cambio en el departamento i .²² Se origina un vector de costos (de mover el departamento i).

La segunda depende también del destino a donde se moverá. Se origina una matriz (de mover el departamento i al destino j).

²⁰ CHEN, G. y ROGEEERS, K. Proposition of Two Multiple Criteria Models Applied to Dynamic Multiobjective Facility Layout Problem Based On Ant Colony Optimization. En: Industrial Engineering and Engineering Management. Diciembre, 2009. 1557 p.

²¹ JARAMILLO, Juan y MCKENDALL, Alan. Dynamic extended facility layout problem. En: IRC Annual Conference, 2004. 2 p.

²² TIAN, Zengbao; LI, Hua y ZHAO, Yinpin. Optimization of Continuous Dynamic Facility Layout Problem with Budget Constraints. En: Information Science and Engineering (ICISE), 2010. 3 p.

Muchos de los costos presentes en estos proyectos son de esta naturaleza, pues dependen de las características específicas de cada departamento. Resulta beneficioso tomar estos costos de esta manera debido a que facilita los cálculos a la vez que resulta en una buena aproximación de los costos del proyecto. La desventaja de usar estos costos es que existen costos fijos totales y costos por pérdidas de producción de gran magnitud que se estarían ignorando. Entonces estos costos se deben usar en empresas en las cuales un paro planeado de producción no tenga impactos muy grandes en los rendimientos de la empresa.

6.2.1.2 Costo Variable

Un costo variable es el que cambia su magnitud en función de las fluctuaciones de los volúmenes de producción. Para el caso de un proyecto de redistribución de planta, el costo variable es el costo asociado con el movimiento de los departamentos²³. En la literatura se encuentra que este costo puede ser en función de la distancia que se trasladan o de las dimensiones del departamento²⁴.

El cálculo del costo por unidad de movimiento de los departamentos puede ser impreciso, por lo cual realizar una evaluación económica basada en éste, arrojaría un resultado desviado de la realidad. La ventaja de calcular el costo del proyecto de redistribución por este medio es que su ejecución es sencilla y sirve para generar rendimientos aproximados del proyecto.

6.2.1.3 Costo Mixto

Este tipo de costo tiene las características tanto de un costo fijo como de uno variable y en algunos casos son llamados semivariabes, pues mantienen una parte fija y otra variable. En un proyecto de redistribución de planta la parte fija de este costo está asociado con desinstalar e instalar los departamentos y con el paro de producción. La parte variable está asociada con el movimiento de los departamentos.

Estos costos, al tener en cuenta tanto los costos fijos como los costos variables es el que puede llegar a ajustarse más al costo real del proyecto. La principal desventaja es que obtener la información de manera detallada es un proceso que consume muchos recursos y se debe evaluar cuando la obtención de esta información se justifica en la precisión de los estimados.

²³ KRISHNAN, K.; CHERAGHI, S. y NAYAK, C. Solving Dynamic Facility Layout Problems Using Dynamic From Between Charts. Wichita State University, departamento de Ingeniería Industrial. 3 p.

²⁴ HERAGU, Sunderesh y KOCHHAR, Bryce. Facility layout design in a changing environment. En: International Journal of Production Research. 1999, vol. 37, no. 11, 2430 p.

6.2.1.4 Costo por pérdida de tiempo producción

Este costo está asociado con las actividades generadas para parar y arrancar una máquina, con la pérdida de rendimiento de producción y con las actividades dispuestas a soportar este último. En un proyecto de redistribución de planta el movimiento de los departamentos implica que estos no puedan seguir produciendo, por lo que se incurre en este costo, las actividades asociadas a éste, pueden ser producir y almacenar inventario extra, ventas perdidas²⁵, entre otros.

Estos costos se deben incluir en el costeo de todos los proyectos, pero no deben ser los únicos incluidos en éste, debido a que los costos de reubicar físicamente los departamentos aportan una magnitud importante del costo del proyecto, por lo que deben ser tenidos en cuenta.

6.2.2 Clasificación de artículos de DFLP según las categorías de costos

Se realizó una revisión bibliográfica de los artículos acerca del problema de distribución de planta dinámico y se clasificó cada uno dependiendo de cómo utilizaban los costos de redistribución de planta, algunos artículos que utilizaban los costos mixtos se clasificaron en las categorías de costos fijos y variables simultáneamente. Se utilizó las siguientes abreviaturas (Tabla 3):

C.F.T: Costo fijo total

C.F.C: Costo fijo con magnitud constante

C.F.V: Costo fijo con magnitud variable

C.V: Costo variable en función de las distancias de traslado

Tabla 3 Clasificación de Costos de los Artículos de DFLP

Artículo	Año	C.F.T	C.F.C	C.F.V	C.V	Pérdida de producción
Islir y Haktanirlar	2009		X			
Raman, Nagalingam y Gurd	2009				X	
Yang, Chuang y Hsu	2011			X		
Nawaz <i>et al</i>	2010			X		
Chen	1998			X		
Rawabdeh y Tahboub	2006				X	
Sahin y Turkbey	2009	X				
Saidi-Mehrabad y Safaei	2007			X		
Haktanirlar y Isler	2010			X		
Aderoba	1997		X			

²⁵ DONG, Ming; WU, Chang y HOU, Forest. Shortest path based simulated annealing algorithm for dynamic facility layout problem under dynamic business environment. *En: Expert Systems With Applications*, 2009. Vol. 36, p 11221-11232.

Baykasoglu y Gindy	2001			X		
Kia <i>et al</i>	2011			X		
Sahin, Ertogral y Turkbey	2010			X		
Chen, Chen y Chuang	2011	X				
Jithavech y Kumar	2010	X				
Jolai, Taghipour y Javadi	2011			X		
Singh	2010			X		
Razazadeh <i>et al.</i>	2009			X		
Balakrishnan <i>et al.</i>	2000	X				
Corry y Kozan	2004			X		
Kulture-Konak	2007	X		X		
Kulture-Konak <i>et al.</i>	2007		X			
Dunker, Radon y Westkamper	2005	X				
Wang	2011					X
Benjaafar	1998			X		

Artículo	Año	C.F.T	C.F.C	C.F.V	C.V	Pérdida de producción
Pillai, Hunagund y Krishnan	2011			X		
Balakrishnan y Cheng	2005		X			
Jaramillo y McKendall	2004			X	X	
Mazinani, Abedzadeh y Moheballi	2012			X		
Ripon, Kyerre y Torrense	2011			X		
Ripon, Kyerre y Torrense	2010			X	X	X
Balakrishnan	1998			X		X
Zoueiri y Tommelein	1999			X		
El-Rayes y Hisham	2009			X	X	
Ripon, Kyerre y Dirk	2011			X		
Mackendall <i>et al</i>	2010			X	X	X
Mackendall <i>et al</i>	2006			X		
Moslemipour y Lee	2011			X		
Braglia, Simone y Zavanella	2005			X		
Chen	2009			X		
Ehsan	2010			X		
Krishnan, Jithavech y Liao	2009				X	
Chen	2007			X		
Erel, Ghosh y Simon	2003	X				
Tian, Li y Zhao	2010			X		
Abedzadeh <i>et al</i>	2012			X	X	
Lacksonen	1997				X	
Chen y Rogers	2009	X				
Lacksonen y Ensore	1993			X		
Meng y Heragu	2004			X		

Dong, Wu y Hou	2009		X		X
Mckendall <i>et al</i>	2006		X		
Urban	1998	X	X		
Singh	2010		X	X	X
Wang	1999		X		
Balakrishan y Cheng	2009		X		
Da Silva <i>et al</i>	2012			X	
Ma y Zhang	2010		X		X
Rosenblatt	1986	X			
Jaramillo y Mckendall	2010		X		

Tabla 4 Frecuencia de los artículos por clasificación de costos

Categoría de Costos	Frecuencia	Porcentaje
Costos Fijos Totales	9	15%
Costos Fijos con Magnitud Constante	5	8%
Costos Fijos con Magnitud Variable	42	70%
Costo Variable en Función de las Distancias de Traslado	12	20%
Costos por Pérdida de Producción	6	10%
total	60	

Se encontró que el 70% de los artículos usaban un costo fijo con magnitud variable. Este resultado refuerza el hecho de que para una estimación, los costos fijos de magnitud variable son precisos comparado con el esfuerzo para la obtención de la información, por lo que es el más recomendado en los problemas de distribución de planta dinámicos con varios periodos en el horizonte de planeación. En el caso de un proyecto de redistribución de planta, que se puede ver como un problema de distribución de planta dinámico con solo dos periodos, el actual y el siguiente, que se realicen una estimación con costos mixtos, donde se incluya tanto los costos fijos, los costos variables y los costos de perdida del tiempo de producción, pues como el horizonte es corto el obtener información precisa es más factible que en un *DFLP* con un horizonte de 10 años.

6.2.3 Clasificación de los costos típicos de un proyecto de redistribución de planta

A partir de la información adquirida en empresas ubicadas en la zona de Cali, se identificaron costos típicos de un proyecto de redistribución de planta y se clasificaron según su comportamiento en las categorías mostradas anteriormente.

6.2.3.1 Costos fijos Totales

- **Directores del proyecto (DP):** Es el personal el cual identifica la oportunidad de mejora sobre la cual se basa el proyecto. Los costos son referentes al tiempo invertido por el personal para identificar y desarrollar la idea, desarrollar el plan, supervisar el proyecto y en la capacitación del personal. Puede ser calculado según las horas dedicadas al proyecto o según el porcentaje de tiempo que le debe dedicar el trabajador al mismo. Éste es independiente de la cantidad de departamentos que se reorganicen.

Ecuación 15 Directores del proyecto

$$DP = \sum_i^n \text{Salario hora}_i * \text{horas dedicadas}_i$$

$$DP = \sum_i^n \text{Salario}_i * \% \text{dedicación}_i$$

- **Asesorías Internas (AI) y Externas (AE):** Para desarrollar el plan del proyecto es posible que se requieran servicios adicionales a los que prestan los directores del proyecto, por ejemplo asesorías en obras civiles, en finanzas, en ingeniería, entre otros. También el mover una máquina puede ser una tarea que requiera de técnicos especializados para garantizar la integridad de la máquina y se necesitan asesorías para la instalación y arranque de la máquina. Además en algunos casos es necesaria la supervisión de personal de la empresa fabricante de las máquinas para mantener la garantía de estas. En otros casos se necesita de técnicos especializados para realizar las pruebas de funcionamiento de las máquinas y equipos. Éste es independiente de la cantidad de departamentos que se reorganicen.

Si las asesorías son internas el costo está relacionado con el tiempo dedicado al desarrollo del plan por los empleados. Si las asesorías son externas se debe tener en cuenta el costo del contrato por prestar éste servicio.

- **Instalaciones eléctricas (IE):** El movimiento de las máquinas puede implicar la necesidad de nuevos puntos de conexión, aumento de iluminación en un sector, etc.

Ecuación 16 Instalaciones eléctricas

$$IE = mtsCable_i * CmtsCable_i + pto_j * Cpto_j$$

mtsCable = metros lineales del cable *i*
CmtsCable = Costo del metro lineal del cable *i*
pto = puntos de conexión tipo *j*
Cpto = Costo del punto de conexión tipo *j*

Este costo depende tanto de los requerimientos de cada departamento como de la infraestructura de la planta. Éstos no se desagregan por departamentos sino que se estima el valor total de la obra.

- Tuberías (Tub): Algunas máquinas además de electricidad necesitan agua, gas o algún insumo que se provee por tuberías, o también para el desecho de algún residuo.

Ecuación 17 Tuberías

$$Tub = mtsTub_i * CmtsTub_i + ptoTub_j * CptoTub_j$$

mtsTub = metros lineales de tubería *i*
CmtsTub = Costo del metro lineal tubería *i*
ptoTub = puntos de conexión de tubería tipo *j*
CptoTub = Costo del punto de conexión de tubería tipo *j*

Este costo depende tanto de los requerimientos de cada departamento como de la infraestructura de la planta. Éstos no se desagregan por departamentos sino que se estima el valor total de la obra.

- Equipo de soporte: El costo de los equipos necesarios para el funcionamiento del sistema, como mesas, sillas, divisiones, cortinas, muebles, etc.
- Capacitación: Como se tiene un nuevo sistema es necesario capacitar al personal para el correcto funcionamiento de este sistema. El costo se causaría si se necesitan de materiales o de personal extra a la empresa.
- Reconocimiento: En algunos casos se otorgan premios al personal que tuvo un papel relevante en el proyecto. Por ejemplo la persona que propone la idea, los líderes de la etapa de adaptación, etc.

6.2.3.2 Costos fijos con magnitud variable

- Adecuación de espacios temporales: Costo de la adecuación de los espacios temporales donde se ubicarán las maquinas, equipos, herramientas e inventario para liberar el espacio requerido para reorganizar los

departamentos. Por ejemplo el costo del cubrimiento de un espacio para aislar un área.

La magnitud de este costo depende de los departamentos que vayan a ser ubicados temporalmente en estos espacios, debido a que cada departamento necesita de unas condiciones específicas para no presentar alteraciones durante su ubicación temporal.

- Costo de proteger áreas: Cuando se lleva a cabo estos proyectos algunas máquinas y equipos requieren unas condiciones sanitarias estrictas, por lo que se necesita un aislamiento especial para éstos. Los costos son relacionados con el material utilizado en aislar las máquinas, equipos o departamentos.

Estos costos dependen de las dimensiones del departamento a proteger y de la naturaleza de la protección.

- Mantenimiento: En algunos casos las máquinas y equipos se deben dejar en un estado apto para la inactividad (libre de contaminantes). Por ejemplo retirar los fluidos de un motor o realizar limpieza a un tanque de mezcla. Por otro lado, existe una necesidad de mantenimiento para poner en funcionamiento el departamento.

El costo del mantenimiento depende de las máquinas y equipos presentes en cada departamento. Esto sucede debido a las diferencias en insumos y procedimientos que requiere cada uno de estos.

- Mano de obra interna: Se debe asignar el costo adicional al salario regular del personal por realizar el movimiento de los departamentos. Por ejemplo horas extras, dominicales, reconocimientos, entre otros.
Derivado de la diferencia que existe entre los departamentos (tamaño, características de la maquinaria y equipos, etc.), existe la misma diferencia en el costo de la mano de obra requerida para moverlos.
- Mano de obra externa: El costo de la mano de obra extra necesaria para ejecutar el proyecto.
- Adecuación de espacios: Es el costo relacionado con los requerimientos de los espacios para ubicar las máquinas y equipos en las posiciones finales. Por ejemplo anclajes para troqueladoras, líneas delimitadoras, señalización, etc. sin incluir los costos de obra civil. Estas necesidades de espacio dependen de los requerimientos específicos de cada departamento.

- **Obra civil:** Son los costos de construcción y demolición de paredes, techos, puertas, ventanas, piso, etc. Cada departamento tiene necesidades específicas de obra civil.
- **Equipo para reorganizar:** Es posible que las máquinas y equipos sean demasiado pesados para mover manualmente o con el equipo existente. Lo que causa un costo de alquiler de montacargas, grúas, etc. para la reubicación de las máquinas. Dependiendo de las máquinas y elementos que se necesiten reubicar de un departamento, así mismo serán los requerimientos de los equipos para reubicar. Estos equipos tienen un costo por unidad de tiempo si son alquilados y un costo de consumo.

Ecuación 18 Equipo para reorganizar

$$\sum_i^n tAlquiler_i \times CAlquiler_i + Consumo_i \times CConsumo_i$$

i: Máquina alquilada i
n: # de máquinas a alquilar

6.2.3.3 Costos fijos magnitud constante

- **Mano de obra empleada para la preparación:** El costo relacionado con la mano de obra adicional a la utilizada normalmente por la planta para la preparación de los departamentos. (Horas extra, Personal externo, recargos, bonificaciones por la tarea). Se considera de magnitud constante, porque las variaciones de preparar un departamento u otro son irrelevante comparado con el costo del proyecto.

6.2.3.4 Costos por pérdidas de producción

- **Outsourcing (OS):** El costo de subcontratar parte de la producción para generar el inventario necesario para suplir el periodo en el cual la planta estará en paro total o parcialmente o, si se decide continuar con la producción durante el paro de los departamentos por medio de un subcontrato, se debe incluir el costo de éste sin tener en cuenta el costo de la materia prima, es decir solo el costo del servicio prestado.

Ecuación 19 Outsourcing

$$OS = (CuSubcontratado_i - Cufabricación_i) * unidades$$

CuSubcontratado = Costo unitario de subcontratar un producto i
Cufabricación = costo unitario de fabricación actual de la empresa
unidades = # unidades subcontratadas
i = producto i

- **Inventario:** Sobre costo de generar inventario extra y sobre costo de almacenarlo. Por ejemplo alquilar una bodega por un determinado tiempo, o trabajar horas extra para generar el inventario. Solo se debe incurrir en el sobre costo de la producción del inventario y no el costo normal, puesto que éste se incurriría así no se realizara el proyecto. También se debe incluir el costo de material de empaque extra en el caso de tener que trasportar el inventario a bodegas externas (estibas, plásticos, etc).
 - **Mano de obra extra:** Es el costo de las horas extras o recargos que genere la producción del inventario adicional, o el costo del personal ajeno a la empresa contratado para esta labor.
 - **Alquiler de bodega:** Es el costo que se pagara por almacenar el inventario extra con recursos ajenos a los actuales de la empresa. Este costo puede ser por número de unidades almacenadas o puede ser un costo fijo de utilizar la bodega.
 - **Empaque:** El almacenar inventario extra de producto terminado o producto en proceso puede requerir empaque extra al normalmente utilizado.
 - **Manejo de materiales:** El producir y almacenar inventario extra puede generar costos de manejo de materiales extras a los actuales de la planta como estibas, estanterías, consumo de insumos por montacargas, bandas transportadoras, etc.
 - **Costo de oportunidad del dinero invertido en el inventario extra (COI):** Se calcula como la rentabilidad esperada de ese dinero si se invirtiera a la tasa de oportunidad del inversionista durante el tiempo que se mantenga el inventario extra.

Ecuación 20 Costo oportunidad del dinero en inventario

$$COI = T_o * tiempo_i * C_{ufabricación_i} * \frac{unidades_i}{2}$$

T_o = Tasa de oportunidad

unidades = # unidades de inventario extra

Tiempo = Tiempo desde que se produce el inventario extra i hasta el cierre del proyecto

- **Ventas perdidas:** En el caso que no se pueda producir o guardar el inventario suficiente para satisfacer la demanda, se debe incluir como un costo del

proyecto las utilidades que se dejarán de percibir. Éste costo se debe estimar según el pronóstico de demanda y los inventarios planeados.

Ecuación 21 Ventas Perdidas

$$\sum_i^n VtasPerdidas_i \times MC_i$$

i: Producto i
n: # de productos a dejar de vender

- Pruebas de calidad: Es el costo asociado con las pruebas de calidad para las máquinas, productos y el sistema. Como productos dañados en pruebas destructivas.

Ecuación 22 Pruebas de calidad

$$\sum_i^n PCostoPrueba_i$$

i: Prueba de calidad i
n: # de pruebas de calidad

6.3 IDENTIFICAR LOS BENEFICIOS QUE GENERA UN PROYECTO DE REDISTRIBUCIÓN A LO LARGO DEL HORIZONTE DE PLANEACIÓN

El problema de distribución de planta ha sido ampliamente estudiado por tener un impacto significativo en los costos de manufactura, en el inventario de trabajo en proceso, en el tiempo de ciclo y en la productividad de la planta.

En la literatura también existen diferentes criterios al momento de evaluar una distribución de planta, estos criterios pueden ser tanto cuantitativos como cualitativos. En los primeros se encuentran minimizar el costo del espacio; minimizar el costo de manejo de materiales; minimizar el costo de reorganizar²⁶, minimizar el *backtracking* y el *bypassing*²⁷, minimizar la congestión del flujo de

²⁶ HICKS, P., y LOWAN, T.. CRAFT-M For Layout Re-Arrangement. En:Industrial Engineering, 1976: 30-35.

²⁷BRAGLIA, M. Optimization Of A Simulated-Annealing-Based Heuristic For Single Row Machine Layout Problem By Genetic Algorithm. En: International Transactions In Operational Research, 1996: 37-49.

material²⁸, minimizar las irregularidades de forma²⁹, y maximizar las adyacencias. También existen artículos que consideran más de 1 objetivo simultáneamente³⁰, que proponen un modelo que minimice el flujo de materiales, de equipos y de información simultáneamente. En los objetivos cualitativos se encuentran la seguridad de la planta, la flexibilidad de la distribución, el ruido y la estética³¹.

El objetivo más usado para encontrar la distribución óptima es minimizar el costo de manejo de materiales^{32,33}. En los últimos años se ha incluido un criterio diferente donde se considera otras medidas de rendimiento operativo, como el inventario de trabajo en proceso (*WIP*) o el tiempo de ciclo (*LT*). En (Fu y Kaku 1997)³⁴, (Benjaafar 1998)³⁵, (Meng, Heragu y Zijm 2004)³⁶ y (Raman, Nagalingam y Gurd 2009)³⁷ se incluye el *WIP*.

La inclusión del *WIP* como criterio de decisión permite considerar los efectos de las variaciones estocásticas en los sistemas productivos. En (Benjaafar 1998) se demuestra que al minimizar el *WIP* no necesariamente se minimiza el MHC, presentando situaciones en la que estos dos objetivos se encuentran en conflicto, enfatizando en que debe ser considerado de manera independiente y resalta su impacto sobre los costos de operación totales de la empresa.

En la práctica el *WIP* de cada estación de trabajo se utiliza para reducir los efectos de la incertidumbre de fabricación y asegurar las tasas de producción y los tiempos de ciclo objetivos³⁸. Un nivel de *WIP* demasiado alto alarga los tiempos de

²⁸ AFENTAKIS, P. A Loop Layout Design Problem For Flexible Manufacturing Systems. En: International Journal Of Flexible Manufacturing Systems, 1989: 143-175.

²⁹ MELLER, R.; NARAYANAN, V. y VANCE, P.. Optimal Facility Layout Design. En: Operations Research Letters, 1999: 117-127.

³⁰ DWERI, F., y F. MEIER, A.. Application Of Fuzzy Decision-Making In Facilities Layout Planning. En: International Journal Of Production Research, 1996: 3207-3225.

³¹ SINGH, S., y SHARMA, R. A Review Of Different Approaches To The Facility Layout Problems. En: International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 2006: 425-433.

³² MCKENDALL Jr., ALAN, R., JIN, shang, y SARAVANAN, Kuppusamy. «Simulated annealing heuristics for the dynamic facility layout problem.» *Computers & Operations Research*, n° 33 (2006): 2431-2444

³³ MELLER, Russell y KAI-YIN, Gau.: The Facility Layout Problem: Recent And Emerging Trends And Perspectives. En Journal Of Manufacturing Systems, 1996: 351-366.

³⁴ FU, Michael, y KAKU, Bharat. Minimizing Work-In-Process And Material Handling In The Facilities Layout Problem. En: IIE Transactions, 1997: 1-29.

³⁵ BENJAAFAR, Saifallah. Design Of Manufacturing Plant Layouts With Queuing Effects . En: IEEE International Conference On Robotics And Automation. Leuven: IEEE, 1998. 260-265.

³⁶ MENG, G.; HERAGU S., y ZIJM, H.. Reconfigurable Layout Problem. En: International Journal Of Production Research, N° 22 (2004): 4709-4729.

³⁷ RAMAN, Dhamodharan; NAGALINGAM, Sev V., y GURD, Bruce . A Genetic Algorithm And Queuing Theory Based Methodology For Facilities Layout Problem. En: International Journal Of Production Research, N° 20 (2009): 5611-5635.

³⁸ GUO, Ruey-Shan; CHIANG, David y PAI, Fan-Yun. A WIP-Based Exception-Management Model For Integrated Circuit Back-End Production Processes. En: International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 2007: 1263-1274.

ciclo y puede disminuir el rendimiento de entregas a tiempo, esto también resulta en mayor ocupación de espacio y mayores requerimientos de recursos para el manejo de materiales³⁹. Pero la principal consecuencia del *WIP* es la reducción en los tiempos de ciclo de manufactura, lo que es estratégicamente importante para el éxito de una empresa. Cuando las empresas pueden despachar sus pedidos más rápido que la competencia, tienen una ventaja competitiva en el mercado⁴⁰. Entonces para incrementar la eficiencia de producción de sistemas de manufactura, debemos reducir los inventarios de trabajo en proceso y el tiempo de ciclo, mientras se cumplan las metas de producción⁴¹.

Por lo anterior, en este trabajo se evaluará la distribución de una planta considerando el costo de manejo de materiales (*MHC*) y el inventario de trabajo en proceso (*WIP*).

A continuación se expone como calcular el *MHC* y el *WIP* de una planta, para lo cual se desarrolló un modelo de colas abierto, basándose en el trabajo de (Benjaafar 1998)⁴² y extendiéndolo para poder evaluar sistemas productivos que posean diferentes sistemas de manejo de materiales. El modelo presentado a continuación tiene limitaciones a la hora de evaluar sistemas productivos muy complejos. En estos casos la simulación es la única aproximación práctica, debido a que capturar analíticamente las diferentes consideraciones de un sistema productivo resulta demasiado complejo.

6.3.1 Consideraciones del modelo

La planta a modelar sigue un sistema *PULL* que tiene un flujo de producción tipo *flowline*, en el cual cada producto tiene una ruta específica, es decir, el 100% de las veces la debe seguir en ese orden estrictamente. Cada producto tiene un valor esperado de la demanda (D_i) y un coeficiente de variación cuadrático C_i^2 y las tasas de llegada y los tiempos de servicio de los departamentos siguen distribuciones arbitrarias. Cabe resaltar que la planta que se modela procesa cada producto como una unidad que se transforma a medida que se procesa en cada departamento, pero no se consideran ensambles.

Esta planta cuenta con un sistema de manejo de materiales, el cual está compuesto por diferentes equipos, que no necesariamente presentan

³⁹ ASKIN, R., y A. KRISHT. Optimal Operation Of Manufacturing Systems With Controlled Work-In-Process Levels. En: International Journal Of Production Economy, 1994: 1637-1653.

⁴⁰ SEPHERI, Mohammad y NAHAVAND, Nasim. Critical WIP Loops: A Mechanism For Material Flow Control In Flow Lines. En: International Journal Of Production Research, 2007: 2759-2773.

⁴¹ BAI, S., Y S. GERSHWIN. Scheduling Manufacturing Systems With Work-In-Process Inventory Control: Multiple-Part-Type Systems. En: International Journal Of Production Research, 1994: 365-386.

⁴² BENJAAFAR, Saifallah. Design Of Manufacturing Plant Layouts With Queuing Effects . En: IEEE International Conference On Robotics And Automation. Leuven: IEEE, 1998. 260-265.

características similares. Las características relevantes para el modelo son la velocidad, el costo de funcionamiento por unidad de distancia y la unidad de carga que manejan; pues estas tienen un impacto en las medidas de rendimiento operativo del sistema.

Además, el flujo de materiales del departamento i al departamento j se hace estrictamente mediante un tipo de equipo de manejo de materiales.

En este proyecto se presenta un modelo de colas abierto donde los tiempos de procesamientos y las tasas de llegada siguen distribuciones generales. Además se incluye en el sistema múltiples sistemas de manejo de materiales que atiende a toda la planta y es modelado como departamentos adicionales. Al considerar que las distribuciones de los tiempos de procesamiento y de las tasas de llegadas sean generales, se permite capturar los efectos de la variabilidad de estos dos procesos. Cada entidad de manejo de materiales representa una agrupación de equipos de manejo de materiales con las mismas características, en cuanto a velocidad, costo y unidad de carga. Para el modelo de colas se incluye un departamento al inicio de la operación (departamento de carga) que cumplen la función de ingresar los productos al sistema, análogamente se incluye un departamento de despacho para representar la salida del sistema.

De acuerdo al sistema productivo planteado en nuestro modelo se consideran los siguientes supuestos:

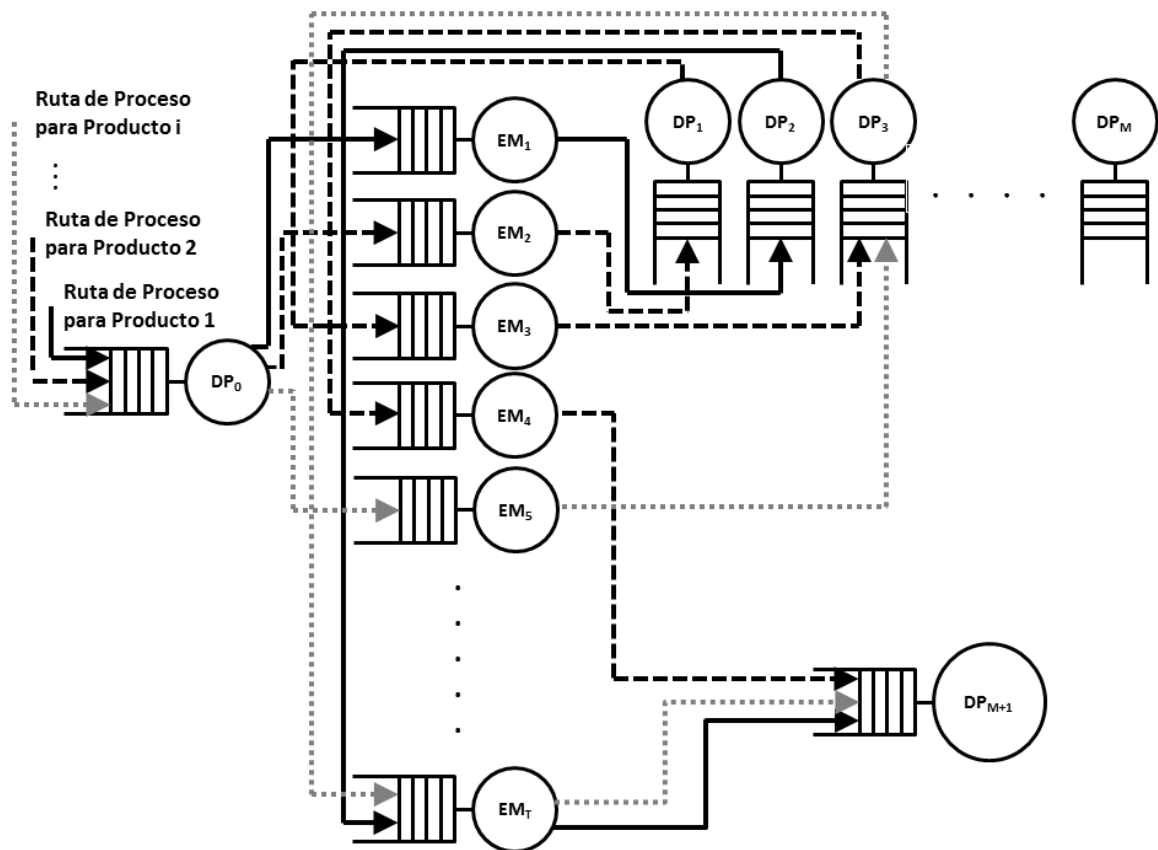
- i. La demanda de cada producto es una variable aleatoria independientemente distribuida.
- ii. Los sistemas de manejo de materiales siguen una política de servicio *FCFS* (*first come -first served*). Y estos se mantienen en la ubicación de la última entrega, hasta ser solicitadas nuevamente.
- iii. Entre el departamento i y el departamento j existe un solo tipo de sistema de manejo de materiales.
- iv. El tiempo de transporte entre del sistema del manejo de materiales es determinístico.
- v. Todos los productos entran al sistema por el departamento de carga y salen de él por el departamento de despacho.
- vi. Los tiempos de procesamiento en cada departamento son independientes e igualmente distribuidos.
- vii. Cada producto tiene una ruta de procesamiento única.

6.3.2 Descripción del modelo

La planta se modela como una red abierta de colas $GI/G/1$ (distribuciones generales de las tasas de arribos y de procesamiento, con un solo servidor), en la cual se dispone de T transportadores que se encargan del transporte de materiales entre los departamentos.

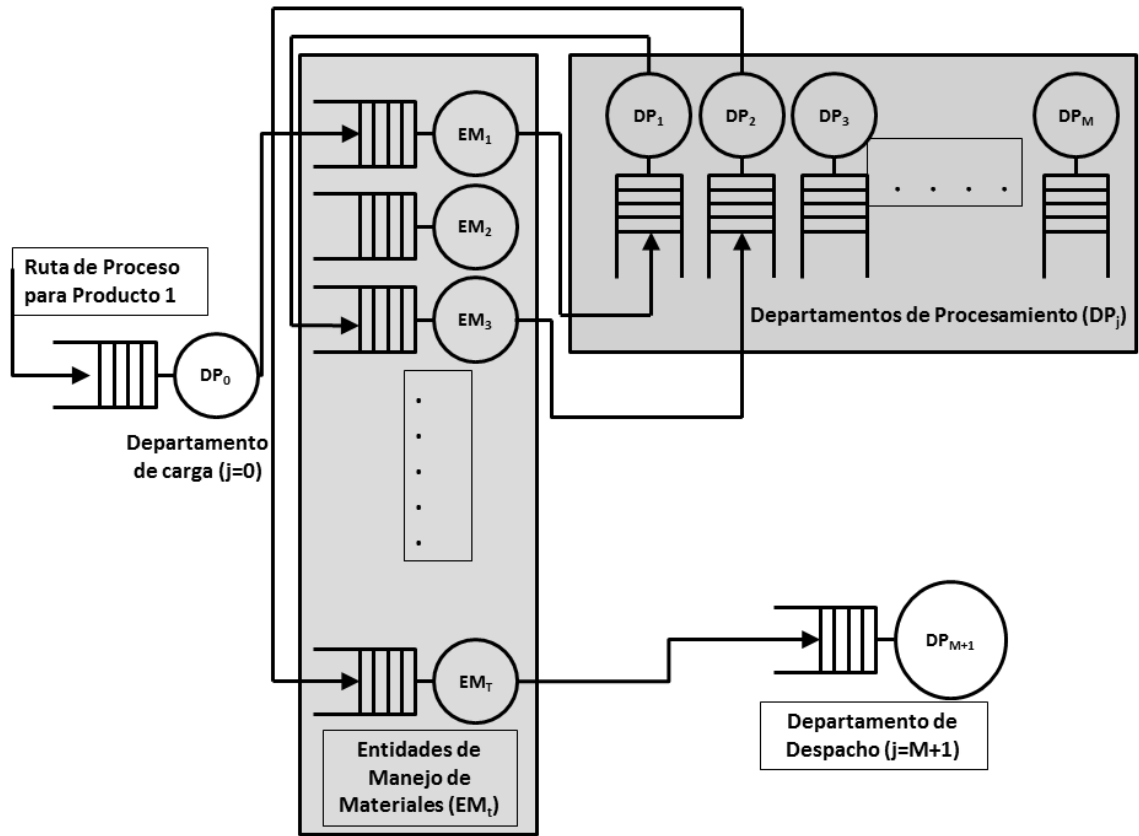
En la figura 7 se muestra el flujo de los productos en el sistema, donde cada producto debe pasar a la respectiva entidad de manejo de materiales, para trasladarse al siguiente departamento. Un departamento puede recibir productos de diferentes entidades de manejo de materiales, que de ahora en adelante llamaremos transportadores, y un transportador puede recibir productos de diferentes departamentos.

Figura 7 Red de colas abierta con múltiples transportadores



En este sistema se tiene definido qué transportador atiende cada flujo; por ejemplo, en la figura 8 se muestra la ruta de un producto por el sistema productivo.

Figura 8 Proceso de un producto con ruta (inicio-DP₁-DP₂-salida)



6.3.3 Metodología del cálculo del *WIP* y *MHC*

El objetivo del presente modelo es evaluar el *WIP* y el *MHC* de un sistema productivo mediante un modelo de colas $G/G/1$ para lo que se utilizó la aproximación de (Kramer y Lagenbach-Belz 1976)⁴³ basada en la ley de Little (Little 1961)⁴⁴. El *WIP* esperado de un departamento depende de los coeficientes de variación cuadráticos de arribos y de servicio del departamento y de la utilización de éste, para lo cual se requiere el tiempo esperado de servicio y la tasa de arribos del departamento. La sección 6.3.4 explica los pasos que deben seguirse para calcular estos parámetros y poder, en la sección 6.3.5, calcular el *WIP* esperado en cada departamento y transportador. La sección 6.3.4 inicia listando los datos de entrada requeridos para estos cálculos; en la 6.3.4.1, se explica la forma de calcular las tasas de arribos agregadas a los departamentos y

⁴³ KRAMER, Wolfgang, y LAGENBACH-BELZ, Manfred. Approximate Formulae For The Delay In The Queueing System $GI/G/1$. En: Congressbook, Eighth Int. Teletraffic Cong., 1976.

⁴⁴ LITTLE, J. D. C. A Proof Of The Queueing Formula $L=\lambda w$. En: Operations Research 9, N° 3 (1961): 383-387.

a los transportadores para lo que se deben construir diferentes matrices; en la 6.3.4.2, se presenta la forma de calcular el tiempo de servicio esperado para los departamentos; en 6.3.4.3 se muestra la manera de calcular el tiempo de servicio esperado para los transportadores; en 6.3.4.4 se muestra la forma de calcular los coeficientes de variación cuadráticos para los tiempos de servicio para transportadores y departamentos; en 6.3.4.5 se explica el cálculo de los coeficientes de variación cuadráticos de las tasas de arribos. Finalmente se calcula el costo de manejo de materiales en la sección 6.3.6.

6.3.4 Cálculo de los parámetros del modelo

Es necesario contar con la siguiente información del sistema productivo para calcular el *WIP* mediante este modelo:

- N : Número de productos procesados en el sistema.
- M : Número de departamentos de procesamiento en el sistema.
- T : Número de transportadores con que cuenta el sistema para el manejo de materiales.
- $M + T + 2$: Número de entidades del sistema

Rutas de los productos: Se indica la ruta de cada producto. Cabe resaltar que un mismo producto no puede procesarse en el mismo departamento más de una vez y todas las rutas deben empezar por 0 y terminar por $M + 1$.

Datos de la demanda: Para cada uno de los N productos debe expresarse el valor esperado de la demanda de lotes por hora (D_i) así como la desviación a la que está sujeta (σ_i).

Costo de los productos: Se debe definir el costo de cada producto ($Cost_i$)

Tamaño de lotes: Cada producto se transporta y se procesa en lotes de B_i unidades.

Matriz de asignación de transportadores: Esta matriz asigna cada uno de los T transportadores a las rutas que debe cubrir.

Tiempos de procesamiento esperados: Cada producto i se caracteriza por el tiempo de procesamiento esperado en el departamento j ($E[S_{ij}]$) y la desviación a la que está sujeto (σ_{ij}) en cada departamento donde es procesado.

Distancia entre Departamentos: Es una matriz donde cada entrada d_{fg} es la distancia rectilínea entre el departamento f y el departamento g .

Velocidades de los transportadores: Para cada transportador debe introducirse la velocidad (v_t) en metros por hora. Este valor se toma como determinístico.

Costo de consumo de los transportadores: Para cada transportador debe introducirse el costo por unidad de distancia recorrida (MHC_t).

6.3.4.1 Tasas de arribos agregadas

Las tasas de llegadas de cada producto al sistema se calculan, de tal forma que se satisfaga la demanda. Las tasas de llegadas a cada departamento (λ_j) se encuentran agregando las tasas de los productos entrantes a cada uno de éstos. Las tasas de llegada a los transportadores (λt_t) se encuentran agregando las tasas de llegada de los productos asignados a éste.

Figura 9 Agregación tasas de arribos

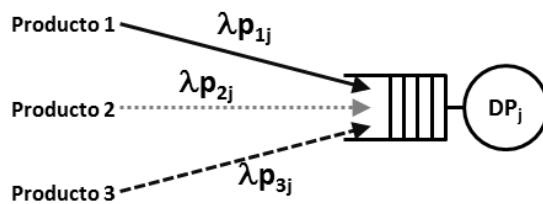
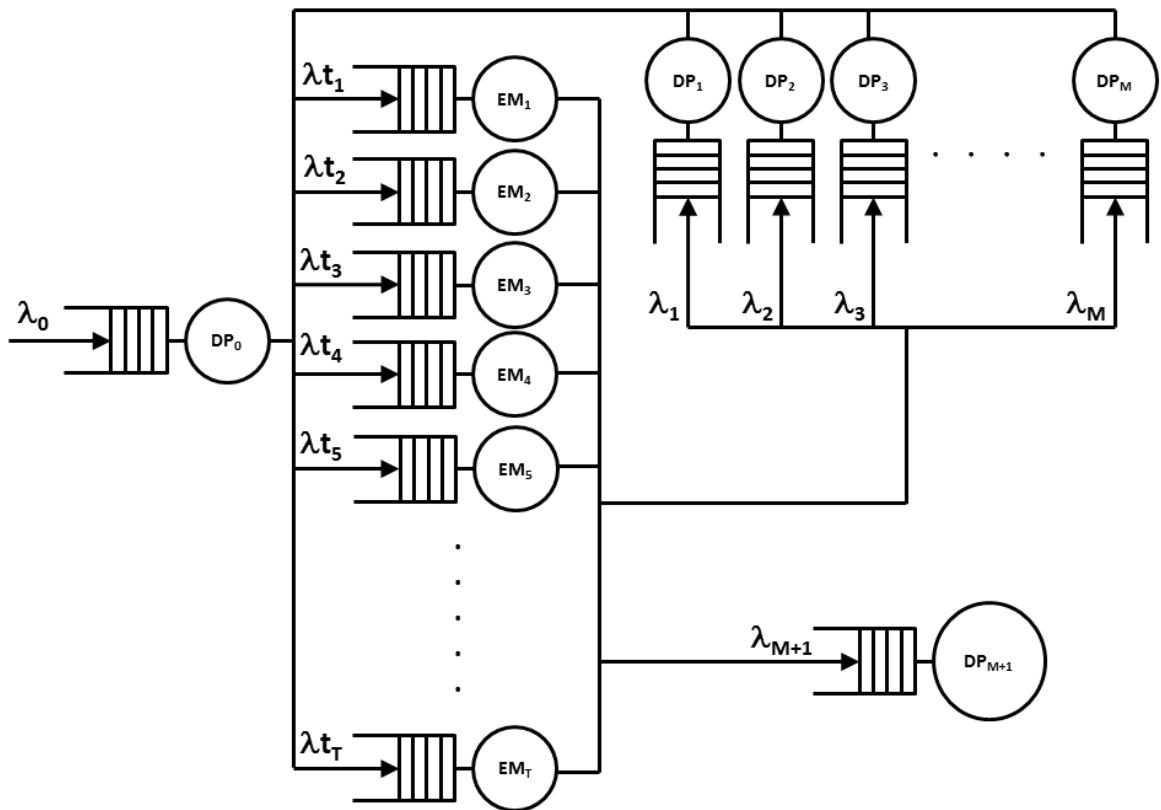


Figura 10 Tasas de arribos agregadas



El proceso de agregar estas tasas es conocido como la superposición de los procesos de llegada individuales.

Para calcular la tasa de arribos agregada a cada entidad, se requiere los flujos de cada producto i que llegan a cada entidad j denotado como (λp_{ij}) . Para hallar esto, se deben definir la matriz de probabilidades de que el producto i vaya de la entidad j a la entidad k (P_{jk}^i) y los flujos externos que lleguen del producto i a la entidad j (γ_j^i). El tamaño de las matrices λp_{ij} y γ_j^i no será sólo $(M + 2) * (M + 2)$ (No. de departamentos), sino que también deben considerarse los T transportadores presentes. En resumen, λp_{ij} y γ_j^i serán de el número de entidades $(M + T + 2) * (M + T + 2)$.

Construcción matriz P_{jk}^i :

Paso 1. La probabilidad de que cualquier producto i pase de un departamento a otro es 0, debido a que debe pasar primero por una entidad de manejo de materiales. Entonces,

Ecuación 23

$$P_{jk}^i = 0 \quad \forall i, j, k$$

Restringido por:

$$0 \leq j \leq M + 1; 0 \leq k \leq M + 1$$

Paso 2. La probabilidad de flujo de cualquier producto i desde cualquier departamento hacia cualquier transportador es una variable binaria definida por:

Ecuación 24

$$P_{jk}^i = \begin{cases} 1 & \text{si el producto } i \text{ se transporta en } k \text{ después de procesarse en } j \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad \forall i, j, k$$

Restringido por:

$$0 \leq j \leq M; M + 2 \leq k \leq M + T + 1$$

Paso 3. La probabilidad de flujo de cualquier producto i desde el departamento de despacho (DP_{M+1}) hacia cualquier transportador es cero debido a que el producto sale del sistema después de llegar a este departamento.

Ecuación 25

$$P_{M+1,k}^i = 0 \quad \forall i, k$$

Paso 4. La probabilidad de flujo de que cualquier producto i pase de un transportador a un departamento es una función definida por:

Ecuación 26

$$P_{jk}^i = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{h=0}^M P_{hj}^i} & \text{si el producto } i \text{ se procesa en } k \text{ después de transportarse en } j \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad \forall i, j, k$$

Restringido por:

$$M + 2 \leq j \leq M + T + 1; 0 \leq k \leq M + 1$$

Paso 5. La probabilidad de que cualquier producto i pase de un transportador a otro es 0. Intuitivamente,

Ecuación 27

$$P_{jk}^i = 0 \quad \forall i, j, k$$

Restringido por:

$$M + 2 \leq j \leq M + T + 1; M + 2 \leq k \leq M + T + 1$$

Construcción γ_j^i :

Este modelo considera una única entrada de materiales al sistema que es el departamento de carga (DP_0). Así, γ_j^i para cualquier producto i estará constituido por la demanda del producto i por hora en la primera posición (asignada al departamento de carga) y ceros en las demás.

Tasas de llegada del producto i al departamento j (λp_{ij})

Ecuación 28⁴⁵ Tasas de llegada del producto i al departamento j (λp_{ij})

$$\lambda p_{ij} = (I - (P_{kj}^i)^T)^{-1} \gamma_j^i$$

Donde I es una matriz identidad de $(M + T + 2) \times (M + T + 2)$.

Tasa de arribos agregada al departamento j (λ_j)

Para el caso del departamento DP_0 , debido a que es la única entrada del sistema, recibe los flujos de material del entorno y, por lo tanto, los flujos de producto λp_{i0} están determinados por la demanda de los productos (D_i).

Por lo tanto,

Ecuación 29 Tasa de arribos agregada al departamento j (λ_j)

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^N \lambda p_{i0}$$

⁴⁵ CURRY, Guy L., y RICHARD, M. Feldman. Manufacturing Systems Modeling And Analysis. New York: Springer, 2009.

Para los demás departamentos,

Ecuación 30

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^N \lambda p_{ij} \quad \text{para } 1 \leq j \leq M + 1$$

Tasa de arribos agregada al transportador t (λt_t)

Ecuación 31 Tasa de arribos agregada al transportador t (λt_t)

$$\lambda t_t = \sum_{i=1}^N \lambda p_{ij} \quad \text{para } M + 2 \leq j \leq M + T + 1; \text{ donde } t = j - M - 1$$

6.3.4.2 Tiempo esperado de servicio en un departamento j ($E[S_j]$)

El valor esperado del tiempo de servicio para una unidad agregada en el departamento j está en función de las probabilidades de que éste atienda cada producto i y del tiempo de servicio para cada producto i en el departamento j ($E[S_{ij}]$).

La probabilidad de atender un producto i en el departamento j (P_{ij}) es el cociente entre la tasa de llegada de ese producto al departamento j y la tasa de arribos agregada del departamento j .

Ecuación 32

$$P_{ij} = \frac{\lambda p_{ij}}{\lambda_j}$$

El tiempo de servicio esperado del departamento j se calcula:

Ecuación 33 Tiempo esperado de servicio en un departamento j ($E[S_j]$)

$$E[S_j] = \sum_{i=1}^N P_{ij} \times E[S_{ij}]$$

6.3.4.3 Tiempo esperado de servicio del transportador t ($E[St_t]$)

El tiempo esperado de servicio del transportador t depende de la distancia entre los departamentos j y k y de la distancia desde el departamento visitado antes de j , puesto que el transportador t cuando termina un recorrido se queda en esa ubicación. La distancia al departamento j se maneja como un valor esperado en función de la probabilidad de que la última entrega sea en el departamento r y en función de la distancia entre el departamento r y el departamento j .

La probabilidad de que el último departamento visitado por el transportador t sea r está dada por:

Ecuación 34⁴⁶

$$P_{rt} = \sum_{m=0}^M \frac{\lambda_{mrt}}{\lambda t_t}$$

Donde λ_{mrt} es el flujo por hora del departamento m al departamento r que se hace por medio de t .

Análogamente, la probabilidad de que ocurra un viaje entre el departamento j y el departamento k realizado por el transportador t es:

Ecuación 35

$$P_{jkt} = \frac{\lambda_{jkt}}{\lambda t_t}$$

Entonces, la probabilidad de que el transportador t realice un viaje del departamento r pase por j y termine en el departamento k , es:

Ecuación 36

$$P_{rjkt} = \sum_{m=0}^M \frac{\lambda_{mrt} \lambda_{jkt}}{\lambda t_t^2}$$

Ahora se calcula el tiempo de viaje del trayecto del departamento r al departamento j y luego al departamento k realizado por el transportador t .

⁴⁶ RAMAN, Dhamodharan; NAGALINGAM, Sev V., y GURD, Bruce . A Genetic Algorithm And Queuing Theory Based Methodology For Facilities Layout Problem. En: International Journal Of Production Research, N° 20 (2009): 5611-5635.

Ecuación 37⁴⁷

$$t_{rjt} = \frac{d_{rj}}{v_t}$$

Ecuación 38

$$t_{jkt} = \frac{d_{jk}}{v_t}$$

Ecuación 39

$$t_{rijt} = t_{rit} + t_{ijt}$$

Ecuación 40

$$t_{rjkt} = \frac{(d_{rj} + d_{jk})}{v_t}$$

Entonces,

Ecuación 41 Tiempo esperado de servicio del transportador t ($E[S_t]$)

$$E[S_t] = \sum_{r=1}^{M+1} \sum_{j=0}^M \sum_{k=1}^{M+1} P_{rjkt} t_{rjkt} \quad \forall t$$

6.3.4.4 Coeficientes de variación cuadráticos de los tiempos de servicio

Por identidad,

Ecuación 42

$$E[S^2] = E[S]^2 \times (1 + C_s^2)$$

Despejando C_s^2 ,

Ecuación 43

$$C_s^2 = \left(\frac{E[S^2]}{(E[S])^2} \right) - 1$$

⁴⁷ RAMAN, Dhamodharan; NAGALINGAM, Sev V., y GURD, Bruce . A Genetic Algorithm And Queuing Theory Based Methodology For Facilities Layout Problem. En: International Journal Of Production Research, N° 20 (2009): 5611-5635.

Coeficiente de variación cuadrático del tiempo de servicio en el departamento j ($C_{s_j}^2$)

Ecuación 44

$$E[S_j^2] = \sum_{i=1}^N P_{ij} E[S_{ij}]^2 (1 + C_{s_{ij}}^2)$$

Entonces,

Ecuación 45 Coeficiente de variación cuadrático del tiempo de servicio en el departamento j ($C_{s_j}^2$)

$$C_{s_j}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N P_{ij} E[S_{ij}]^2 (1 + C_{s_{ij}}^2)}{(\sum_{k=1}^N P_{ij} E[S_{ij}])^2} - 1 \quad \forall j$$

Donde,

Ecuación 46

$$C_{s_{ij}}^2 = \frac{\sigma_{ij}^2}{E[S_{ij}]^2}$$

Coeficiente de variación cuadrático del tiempo de servicio en el transportador t ($C_{st_t}^2$)

De manera análoga,

Ecuación 47

$$C_{st_t}^2 = \left(\frac{E[S_{t_t}^2]}{E[S_{t_t}]^2} \right) - 1$$

Ecuación 48

$$E[S_{t_t}^2] = \sum_{r=1}^{M+1} \sum_{j=0}^M \sum_{k=1}^{M+1} P_{rjkt} (t_{rjkt})^2$$

Ecuación 49 Coeficiente de variación cuadrático del tiempo de servicio en el transportador t ($CS_{t_t}^2$)

$$C_{st_t}^2 = \left(\frac{\left(\sum_{r=1}^{M+1} \sum_{j=0}^M \sum_{k=1}^{M+1} P_{rjkt} (t_{rjkt})^2 \right)}{\left(\sum_{r=1}^{M+1} \sum_{j=0}^M \sum_{k=1}^{M+1} P_{rjkt} t_{rjkt} \right)^2} \right) - 1 \quad \forall t$$

6.3.4.5 Coeficiente de variación cuadrático de las tasas de arribos

El coeficiente de variación cuadrático agregado se calcula como un promedio ponderado de los coeficientes de variación cuadráticos de arribos de los flujos que entran al departamento j ($C_{a_{kj}}^2$). La ponderación se realiza como la probabilidad de que ocurra un flujo determinado hacia el departamento j (P_{kj}), por la proporción de flujo que representa para ese departamento.

El coeficiente de variación cuadrático de arribos del flujo del departamento k al departamento j ($C_{a_{kj}}^2$), está dado por la probabilidad de que ocurra ese flujo por el coeficiente de variación cuadrático de salida del departamento k ($C_{d_k}^2$), más la probabilidad de que no ocurra este flujo. Según (Curry y Feldman 2009),

Ecuación 50

$$C_{a_{kj}}^2 = P_{kj} C_{d_k}^2 + (1 - P_{kj})$$

Donde,

Ecuación 51

$$C_{d_k}^2 = (1 - u_k^2) C_{a_k}^2 + u_k^2 C_{s_k}^2$$

Entonces,

Ecuación 52

$$C_{a_j}^2 = \sum_{k=1}^{M+T+1} \frac{\lambda_k P_{kj}}{\lambda_j} (C_{a_{kj}}^2)$$

Ecuación 53

$$C_{a_j}^2 = \sum_{k=1}^{M+T+1} \frac{\lambda_k P_{kj}}{\lambda_j} (P_{kj} ((1 - u_k^2) C_{a_k}^2 + u_k^2 C_{s_k}^2) + 1 - P_{kj})$$

Donde,

Ecuación 54

$$P_{kj} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda p_{ik} P_{kj}^i}{\lambda_j} \quad \forall j, k = 0, \dots, M + T + 1$$

Ecuación 55

$$u_k = \lambda_k \times E[S_k]$$

Resultando en un sistema de ecuaciones, el cual se puede aproximar de la siguiente manera según (Curry y Feldman 2009)⁴⁸,

Ecuación 56

$$C_{ag}^2 \approx (I - Q^T)^{-1} \mathbf{b}$$

Donde,

Ecuación 57

$$Q = q_{kj} = \frac{\lambda_k P_{kj}^2 (1 - u_k^2)}{\lambda_j}$$

Ecuación 58

$$\mathbf{b} = \sum_{j=1}^{M+T+1} \frac{\lambda_k P_{kj}}{\lambda_j} ((P_{kj} u_k^2 C_{sk}^2) + (1 - P_{kj}))$$

Coefficiente de variación cuadrático para las tasas de arribos al departamento j (C_{aj}^2)

El coeficiente de variación cuadrático de la tasa de arribos al departamento 0, es el promedio ponderado de los coeficientes de variación cuadráticos de las tasas de llegada de los productos ya que la única variación a la que se encuentra sujeto es a la de la demanda.

⁴⁸ CURRY, Guy L., y RICHARD, M. Feldman. Manufacturing Systems Modeling And Analysis. New York: Springer, 2009.

Ecuación 59 Coeficiente de variación cuadrático para las tasas de arribos al departamento 0 ($C_{a_0}^2$)⁴⁹

$$C_{a_0}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda p_{i0}}{\lambda_0} C_i^2$$

Para los demás departamentos, se halla como:

Ecuación 60 Coeficiente de variación cuadrático para las tasas de arribos al departamento j ($C_{a_j}^2$)

$$C_{a_j}^2 = C_{a_g}^2 \text{ para } j = g, 1 \leq g \leq M + 1$$

Coeficiente de variación cuadrático para las tasas de arribos al transportador t ($C_{at_t}^2$)

Ecuación 61 Coeficiente de variación cuadrático para las tasas de arribos al transportador t ($C_{at_t}^2$)

$$C_{at_t}^2 = C_{a_g}^2 \text{ para todo } t = g - M - 1 \text{ y para } M + 2 \leq g \leq M + T + 1$$

6.3.5 Cálculo del *WIP*

Para calcular el valor esperado del *WIP* en el sistema productivo se debe calcular el *WIP* de cada producto *i* en cada departamento *j* y en cada transportador *t* de la siguiente forma:

El *WIP* de un producto *i* en un departamento *j* se define como el producto entre la tasa de arribos del producto *i* y el tiempo promedio en el departamento CT_{S_j} .

Ecuación 62

$$CT_{S_j} = CT_{q_j} + E[S_j]$$

Donde:

CT_{q_j} : Tiempo promedio de espera en cola en el departamento *j*.

$E[S_j]$: Tiempo esperado de servicio en el departamento *j*.

El tiempo promedio en cada departamento se calcula:

⁴⁹ CURRY, Guy L., y RICHARD, M. Feldman. Manufacturing Systems Modeling And Analysis. New York: Springer, 2009.

Ecuación 63

$$CT_{S_j}(G/G/1) \approx g_j(u_j, C_{a_j}^2, C_{s_j}^2) \times \left(\frac{C_{a_j}^2 + C_{s_j}^2}{2} \right) CT_{q_j}(M/M/1) + E[S_j]$$

Resolviendo el tiempo promedio en cola,

Ecuación 64

$$CT_{S_j}(G/G/1) \approx g_j(u_j, C_{a_j}^2, C_{s_j}^2) \times \left(\frac{C_{a_j}^2 + C_{s_j}^2}{2} \right) \left(\frac{u_j}{1 - u_j} \right) E[S_j] + E[S_j]$$

Donde:

$C_{a_j}^2$: Coeficiente de variación cuadrático del tiempo entre arribos del departamento j .

$C_{s_j}^2$: Coeficiente de variación cuadrático del tiempo de servicio del departamento j .

$$u_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j}$$

$$\mu_j = \frac{1}{E[S_j]}$$

Ecuación 65

$$g_j(u_j, C_{a_j}^2, C_{s_j}^2) \times = \begin{cases} \exp \left\{ -\frac{2(1 - u_j)}{3u_j} \frac{(1 - C_{a_j}^2)^2}{(C_{a_j}^2 + C_{s_j}^2)} \right\} & \text{para } C_{a_j}^2 < 1 \\ 1 & \text{para } C_{a_j}^2 \geq 1 \end{cases}$$

Por la ley de *Little* se puede calcular el *WIP* de cada producto i en cualquier departamento j .

Ecuación 66

$$WIP_{ij} = CT_{S_j} \times \lambda p_{ij}$$

Remplazando $CT_{S_j}(G/G/1)$ se obtiene:

Ecuación 67 *WIP* del producto *i* en el departamento *j*

$$E[WIP_{ij}] \approx g_j(u_j, C_{a_j}^2, C_{s_j}^2) \times \left(\frac{C_{a_j}^2 + C_{s_j}^2}{2} \right) \left(\frac{u_j}{1 - u_j} \right) E[S_j] \lambda_{p_{ij}} + E[S_j] \lambda_{p_{ij}}$$

De manera análoga, para un transportador *t*,

$$u_t = \frac{\lambda_t}{\mu_t}$$

$$\mu_t = \frac{1}{E[S_t]}$$

Ecuación 68 *WIP* del producto *i* en el transportador *t*

$$E[WIP_{it}] \approx g_t(u_t, C_{at}^2, C_{st}^2) \times \left(\frac{C_{at}^2 + C_{st}^2}{2} \right) \left(\frac{u_t}{1 - u_t} \right) E[S_t] \lambda_{p_{ij}} + E[S_t] \lambda_{p_{ij}}$$

Ya teniendo la ecuación para el *WIP* de cada producto en cada uno de los departamentos y de los transportadores, Se calcula el valor de los productos en inventario de trabajo en proceso para posteriormente ser evaluados económicamente.

Ecuación 69 *WIP* de la planta

VALOR PRODUCTOS *WIP*

$$= \sum_{j=0}^{M+1} \sum_{i=1}^N E[WIP_{ij}] Cost_i * B_i + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N E[WIP_{it}] Cost_i * B_i$$

6.3.6 Cálculo del *MHC*

El costo de manejo de materiales se calcula mediante el mismo modelo, puesto que permite considerar el efecto de las variaciones estocásticas de los sistemas productivos, a diferencia de la manera tradicional de calcularlo.

El costo de manejo de materiales por unidad de tiempo, se encuentra como el producto entre la utilización de cada entidad de manejo de materiales por el costo por unidad de tiempo de cada transportador. Dependiendo de la duración de cada periodo de planeación se puede hallar el costo de manejo de materiales para ese periodo.

Ecuación 70 Costo de MHC

$$MHC \text{ periodo de planeación} = \sum_{t=1}^T ut_t * v_t * MHC_t * \text{Tiempo periodo de planeación}$$

6.3.7 Evaluación económica del *WIP* y *MHC*

El costo de manejo de materiales es un costo que se causa por el consumo de los equipos requeridos en la operación del sistema productivo, por lo que si se reduce o aumenta, con la implementación de un proyecto de redistribución de planta, representa un cambio en los flujos de caja de la empresa. Estos costos serán considerados como flujos de caja del proyecto.

El *WIP* tiene un impacto significativo en los costos de producción de la empresa y controlarlo permite asegurar tasas de producción objetivos. Pero la principal consecuencia de disminuir el *WIP* es la reducción en los tiempos de ciclo de manufactura, lo que es estratégicamente importante para el éxito de una empresa. El mantener *WIP* en un sistema productivo genera diferentes tipos de costos como el costo del personal encargado de manejarlo, el costo de equipos de manejo de materiales adicional, se requiere mayor espacio, entre otros. Los anteriores costos son difíciles de cuantificar de manera precisa y por esto no se tendrán en cuenta para la evaluación económica del proyecto. Por lo tanto el efecto de un cambio en el *WIP* de la planta en el flujo de caja del proyecto se considerará como un cambio en el capital de trabajo.

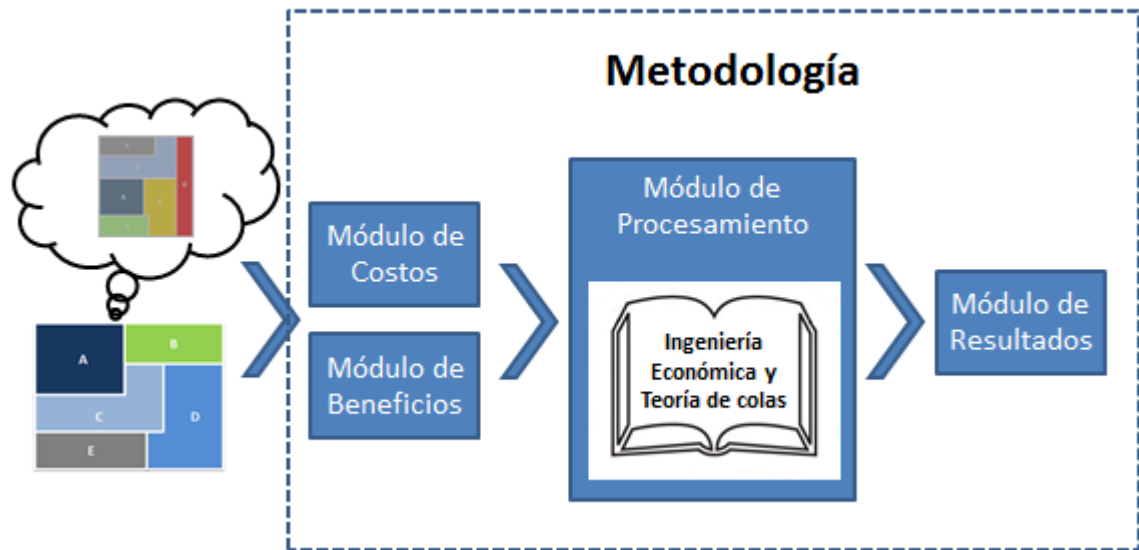
6.4 DESARROLLAR UNA METODOLOGÍA QUE ADAPTE CADA MÉTODO DE INGENIERÍA ECONÓMICA SELECCIONADO A LAS CONDICIONES ESPECÍFICAS DE LOS PROYECTOS DE REDISTRIBUCIÓN DE PLANTA.

A partir del trabajo generado en los objetivos específicos anteriores, se desarrolló una metodología para evaluar económicamente proyectos de redistribución de planta. Para esto se elaboró una herramienta compuesta por una aplicación en el programa MATLAB y Microsoft Excel, la cual recibe la información de entrada requerida para calcular los costos y los beneficios causados por un proyecto de este tipo, los procesa y presenta los resultados. Esta herramienta analiza la viabilidad económica del proyecto propuesto y además genera información útil para tomar la decisión de implementar el proyecto.

Esta metodología está compuesta por cuatro módulos (Ver Figura 11). El primero de ellos, el módulo de costos, recoge la información de los costos causados por el proyecto (Sección 6.4.1). El segundo, el módulo de beneficios, recoge los parámetros requeridos para calcular los beneficios proyectados resultado de la

reducción en niveles de *WIP* y de *MHC* (Sección 6.4.2). El tercero, el módulo de procesamiento, calcula el costo total del proyecto y los beneficios proyectados para así evaluar económicamente el proyecto (Sección 6.4.3). Por último, el módulo de resultados, muestra un análisis e interpretación de los resultados obtenidos por la herramienta (6.4.4).

Figura 11 Funcionamiento de la Metodología



6.4.1 Módulo Costos

En este módulo se introducen los costos causados por el proyecto. Esto se realiza a través de un archivo de Excel nombrado *Costos.xls*, en el cuál cada hoja contiene los campos requeridos para calcular cada costo del proyecto. A continuación se explica cada costo y se muestra una imagen de los campos que se deben llenar en la herramienta.

6.4.1.1 Directores del proyecto

Es el personal el cual identifica la oportunidad de mejora sobre la cual se basa el proyecto. Los costos son referentes al tiempo invertido por el personal para identificar y desarrollar la idea, desarrollar el plan, supervisar el proyecto y en la capacitación del personal.

Número de directores	2	
	Salario/Mes	% Dedicación
Director 1		
Director 2		
Costo de los directores	\$	-

6.4.1.2 Asesorías Internas y Externas

Para desarrollar el plan del proyecto es posible que se requieran servicios adicionales a los que prestan los directores del proyecto, por ejemplo asesorías en obras civiles, en finanzas, en ingeniería, entre otros. También el mover una máquina puede ser una tarea que requiera de técnicos especializados para garantizar la integridad de la máquina y se necesitan asesorías para la instalación y arranque de la máquina. Además en algunos casos es necesaria la supervisión de personal de la empresa fabricante de las máquinas para mantener la garantía de estas. En otros casos se necesita de técnicos especializados para realizar las pruebas de funcionamiento de las máquinas y equipos.

Número de asesorías internas	8	Costo de las asesorías	\$	-
Número de asesorías externas	7			

	Salario/Mes	%Dedicación		Pago
Asesor Interno 1			Asesor Externo 1	
Asesor Interno 2			Asesor Externo 2	
Asesor Interno 3			Asesor Externo 3	
Asesor Interno 4			Asesor Externo 4	
Asesor Interno 5			Asesor Externo 5	
Asesor Interno 6			Asesor Externo 6	
Asesor Interno 7			Asesor Externo 7	
Asesor Interno 8				

6.4.1.3 Instalaciones eléctricas

El movimiento de las máquinas puede implicar la necesidad de nuevos puntos de conexión, aumento de iluminación en un sector, etc.

Tipos de cable a instalar		6	Costo de las instalaciones eléctricas		\$	-
Tipos de puntos eléctricos a instalar		3				

	Metros a utilizar	Costo por metro		Puntos a instalar	Costo por punto
Cable Tipo 1			Punto Tipo 1		
Cable Tipo 2			Punto Tipo 2		
Cable Tipo 3			Punto Tipo 3		
Cable Tipo 4					
Cable Tipo 5					
Cable Tipo 6					

6.4.1.4 Tuberías

Algunas máquinas además de electricidad necesitan agua, gas o algún insumo que se provee por tuberías, o también para el desecho de algún residuo.

Tipos de tubería a instalar		9	Costo de la tubería		\$	-
Tipos de puntos de acceso a instalar		5				

	Metros a utilizar	Costo por metro		Puntos a instalar	Costo por punto
Tubería Tipo 1			Punto Tipo 1		
Tubería Tipo 2			Punto Tipo 2		
Tubería Tipo 3			Punto Tipo 3		
Tubería Tipo 4			Punto Tipo 4		
Tubería Tipo 5			Punto Tipo 5		
Tubería Tipo 6					
Tubería Tipo 7					
Tubería Tipo 8					
Tubería Tipo 9					

6.4.1.5 Equipo de soporte

El costo de los equipos necesarios para el funcionamiento del sistema, como mesas, sillas, divisiones, cortinas, muebles, etc.

Tipos de equipo de soporte		17	Costo del equipo de soporte	\$ -
		Tiempo a utilizar	Costo por tiempo	
Equipo Tipo 1				
Equipo Tipo 2				
Equipo Tipo 3				
Equipo Tipo 4				
Equipo Tipo 5				
Equipo Tipo 6				
Equipo Tipo 7				
Equipo Tipo 8				
Equipo Tipo 9				
Equipo Tipo 10				
Equipo Tipo 11				
Equipo Tipo 12				
Equipo Tipo 13				
Equipo Tipo 14				
Equipo Tipo 15				
Equipo Tipo 16				
Equipo Tipo 17				

6.4.1.6 Capacitación

Como se tiene un nuevo sistema es necesario capacitar al personal para el correcto funcionamiento de este sistema. El costo se causaría si se necesitan de materiales o de personal extra a la empresa.

Tipos de capacitación		4	Costo de la capacitación	\$ -
		Costo		
Capacitación Tipo 1				
Capacitación Tipo 2				
Capacitación Tipo 3				
Capacitación Tipo 4				

6.4.1.7 Reconocimiento

En algunos casos se otorgan premios al personal que tuvo un papel relevante en el proyecto. Por ejemplo la persona que propone la idea, los líderes de la etapa de adaptación, etc.

Número de reconocimientos	6	Costo de los reconocimientos	\$ -
		Costo	
Reconocimiento 1			
Reconocimiento 2			
Reconocimiento 3			
Reconocimiento 4			
Reconocimiento 5			
Reconocimiento 6			

6.4.1.8 Adecuación de espacios temporales

Costo de la adecuación de los espacios temporales donde se ubicarán las máquinas, equipos, herramientas e inventario para liberar el espacio requerido para reorganizar los departamentos. Por ejemplo el costo del cubrimiento de un espacio para aislar un área.

Número de espacios temporales a adecuar	3	Costo de los espacios temporales a adecuar	\$ -
		Costo	
Espacio temporal 1			
Espacio temporal 2			
Espacio temporal 3			

6.4.1.9 Costo de proteger áreas

Cuando se llevan a cabo estos proyectos algunas máquinas y equipos requieren unas condiciones sanitarias estrictas, por lo que se necesita un aislamiento especial para éstos. Los costos son relacionados con el material utilizado en aislar las máquinas, equipos o departamentos.

Tipos de protección de áreas	2	Costo de protección de áreas	\$ -
		Área a proteger (m ²)	Costo por m ²
Protección Tipo 1			
Protección Tipo 2			

6.4.1.10 Mantenimiento

En algunos casos las máquinas y equipos se deben dejar en un estado apto para la inactividad (libre de contaminantes). Por ejemplo retirar los fluidos de un motor

o realizar limpieza a un tanque de mezcla. Por otro lado, existe una necesidad de mantenimiento para poner en funcionamiento el departamento.

Tipos de mantenimiento		12	Costo del mantenimiento		\$ -
		Cantidad a realizar		Costo	
Mantenimiento tipo 1					
Mantenimiento tipo 2					
Mantenimiento tipo 3					
Mantenimiento tipo 4					
Mantenimiento tipo 5					
Mantenimiento tipo 6					
Mantenimiento tipo 7					
Mantenimiento tipo 8					
Mantenimiento tipo 9					
Mantenimiento tipo 10					
Mantenimiento tipo 11					
Mantenimiento tipo 12					

6.4.1.11 Mano de obra interna

Se debe asignar el costo adicional al salario regular del personal por realizar el movimiento de los departamentos. Por ejemplo horas extras, dominicales, reconocimientos, entre otros.

Número de trabajadores internos asignados al proyecto		23	Costo de la mano de obra interna		\$ -
				Cargo adicional	
Trabajador 1					
Trabajador 2					
Trabajador 3					
Trabajador 4					
Trabajador 5					
Trabajador 6					
Trabajador 7					
Trabajador 8					
Trabajador 9					
Trabajador 10					
Trabajador 11					
Trabajador 12					
Trabajador 13					
Trabajador 14					
Trabajador 15					
Trabajador 16					
Trabajador 17					
Trabajador 18					
Trabajador 19					
Trabajador 20					
Trabajador 21					
Trabajador 22					
Trabajador 23					

6.4.1.12 Mano de Obra externa

Es el costo de la mano de obra extra necesaria para ejecutar el proyecto, en éste se deben incluir el costo de contratar a los trabajadores para ejecutar el proyecto.

Número de trabajadores externos	10	Costo Mano de obra externa	\$ -
Trabajador	Costo del contrato		
	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
	7		
	8		
	9		
	10		

6.4.1.13 Adecuación de espacios

Es el costo relacionado con los requerimientos de los espacios para ubicar las maquinas y equipos en las posiciones finales. Por ejemplo anclajes para troqueladoras, líneas delimitadoras, señalización, etc. sin incluir los costos de obra civil. Estas necesidades de espacio dependen de los requerimientos específicos de cada departamento

No. de departamentos a adecuar	5	Costo Adecuación de espacios	\$ -
	Costo Adecuación		
Departamento 1			
Departamento 2			
Departamento 3			
Departamento 4			
Departamento 5			

6.4.1.14 Obra Civil

Son los costos de construcción y demolición de paredes, techos, puertas, ventanas, piso, etc. Cada departamento tiene necesidades específicas de obra civil.

No. de Obras Civiles	<input type="text" value="10"/>	Costo de Obra Civil	\$ -
		Costo de la obra	
Obra civil 1	<input type="text"/>		
Obra civil 2	<input type="text"/>		
Obra civil 3	<input type="text"/>		
Obra civil 4	<input type="text"/>		
Obra civil 5	<input type="text"/>		
Obra civil 6	<input type="text"/>		
Obra civil 7	<input type="text"/>		
Obra civil 8	<input type="text"/>		
Obra civil 9	<input type="text"/>		
Obra civil 10	<input type="text"/>		

6.4.1.15 Equipo para reorganizar

Es posible que las máquinas y equipos sean demasiado pesados para mover manualmente o con el equipo existente. Lo que causa un costo de alquiler de montacargas, grúas, etc. para la reubicación de las máquinas. Dependiendo de las máquinas y elementos que se necesiten reubicar de un departamento, así mismo serán los requerimientos de los equipos para reubicar. Estos equipos tienen un costo por unidad de tiempo si son alquilados y un costo de consumo.

No. Equipos para Reorganizar	<input type="text" value="10"/>	Costo Equipos para reorganizar	\$ -
	Costo Alquiler periodo	Costo Consumo por periodo	Periodos utilizados
Equipo 1			
Equipo 2			
Equipo 3			
Equipo 4			
Equipo 5			
Equipo 6			
Equipo 7			
Equipo 8			
Equipo 9			
Equipo 10			

6.4.1.16 Mano de obra para la preparación del proyecto

Es el costo relacionado con la mano de obra adicional a la utilizada normalmente por la planta para la preparación de los departamentos. (Horas extra, Personal externo, recargos, bonificaciones por la tarea).

No. de trabajadores	<input type="text" value="10"/>	Costo de Mano de obra Preparación	\$ -
	Pagos		
Trabajador 1			
Trabajador 2			
Trabajador 3			
Trabajador 4			
Trabajador 5			
Trabajador 6			
Trabajador 7			
Trabajador 8			
Trabajador 9			
Trabajador 10			

6.4.1.17 Outsourcing

El costo de subcontratar parte de la producción para generar el inventario necesario para suplir el periodo en el cual la planta estará en paro total o parcial o, si se decide continuar con la producción durante el paro de los departamentos por medio de un subcontrato. El costo radica en el incremento del costo de producción por unidad.

No. Productos Subcontratados	10	Costo de Subcontratar	\$ -
	Costo por unidad subcontratada	Costo por unidad fabricada en planta	Unidades Subcontratadas
Producto 1			
Producto 2			
Producto 3			
Producto 4			
Producto 5			
Producto 6			
Producto 7			
Producto 8			
Producto 9			
Producto 10			

6.4.1.18 Costo de Inventario

Es el costo de generar inventario extra y sobre costo de almacenarlo. Por ejemplo alquilar una bodega por un determinado tiempo, o trabajar horas extra para generar el inventario. Solo se debe incurrir en el sobre costo de la producción del inventario y no el costo normal. También se debe incluir el costo de material de empaque extra en el caso de tener que transportar el inventario a bodegas externas (estibas, plásticos, etc).

- Mano de obra extra: Es el costo de las horas extras o recargos que genere la producción del inventario adicional, o el costo del personal ajeno a la empresa contratado para esta labor.
- Alquiler de bodega: Es el costo que se pagara por almacenar el inventario extra con recursos ajenos a los actuales de la empresa. Este costo puede ser por número de unidades almacenadas o puede ser un costo fijo de utilizar la bodega.
- Empaque: El almacenar inventario extra de producto terminado o producto en proceso puede requerir empaque extra al normalmente utilizado.
- Manejo de materiales: El producir y almacenar inventario extra puede generar costos de manejo de materiales extras a los actuales de la

planta como estibas, estanterías, consumo de insumos por montacargas, bandas transportadoras, etc.

- o Costo de oportunidad del dinero invertido en el inventario extra (COI).

No. Productos en inventario	5			Valor del Producto en inventario	\$ -
				Costo de inventario	\$ -
	Costo del Producto	Costo de Almacenar (\$/unid-tiempo)	Unidades promedio a inventariar	Tiempo de almacenado(años)	
Producto 1					
Producto 2					
Producto 3					
Producto 4					
Producto 5					

6.4.1.19 Ventas Perdidas

En el caso que no se pueda producir o guardar el inventario suficiente para satisfacer la demanda, se debe incluir como un costo del proyecto las utilidades que se dejarán de percibir. Éste costo se debe estimar según el pronóstico de demanda y los inventarios planeados.

No. Productos que pierden ventas	10		Costo Ventas Perdidas	\$ -
	Margen de contribución (unidad)	# Unidades de ventas perdidas		
Producto 1				
Producto 2				
Producto 3				
Producto 4				
Producto 5				
Producto 6				
Producto 7				
Producto 8				
Producto 9				
Producto 10				

6.4.1.20 Pruebas de calidad

Es el costo asociado con las pruebas de calidad para las máquinas, productos y el sistema. Como es el caso de productos dañados en las pruebas destructivas.

No. Pruebas de calidad	<input type="text" value="5"/>	Costo Pruebas de Calidad \$	-
	Costo de la prueba		
Prueba de calidad 1	<input type="text"/>		
Prueba de calidad 2	<input type="text"/>		
Prueba de calidad 3	<input type="text"/>		
Prueba de calidad 4	<input type="text"/>		
Prueba de calidad 5	<input type="text"/>		

6.4.1.21 Otros costos

Cada proyecto de redistribución de planta tiene características específicas, las cuales pueden generar diferentes costos.

No. Otros Costos	<input type="text" value="10"/>	Costo Pruebas de Calidad \$	-
	Costo		
Costo 1	<input type="text"/>		
Costo 2	<input type="text"/>		
Costo 3	<input type="text"/>		
Costo 4	<input type="text"/>		
Costo 5	<input type="text"/>		
Costo 6	<input type="text"/>		
Costo 7	<input type="text"/>		
Costo 8	<input type="text"/>		
Costo 9	<input type="text"/>		
Costo 10	<input type="text"/>		

6.4.2 Beneficios

En este módulo se introducen la información requerida para calcular los beneficios del proyecto. Los beneficios son la reducción del costo de manejo de materiales (*MHC*) y la reducción de inventario de trabajo en proceso (*WIP*). Para ello se requiere una información de entrada, la cual se debe introducir en el documento Beneficios.xls, cada hoja del documento contiene un parámetro para calcular los beneficios del proyecto.

6.4.2.1 Información general

Se deben llenar los campos en blanco y hundir el botón iniciar.

Número de Departamentos	30
Número de Productos	30
Número de Transportadores	30

Iniciar

6.4.2.2 Ruta de los productos

Se indica la ruta de cada producto. Para cada producto se introducen en orden los departamentos que visita en el proceso de producción, si un producto no visita todos los departamentos se dejan los espacios en blanco al final de los pasos.

Producto \ paso	1	2	3	4	5
1					
2					
3					
4					
5					

6.4.2.3 Demanda

Para cada uno de los productos debe ingresar el valor esperado de la demanda en lotes por hora.

6.4.2.4 Desviación de la demanda

Para cada uno de los productos debe ingresarse la desviación de la demanda en lotes por hora.

6.4.2.5 Costo de los productos

Se debe definir el costo de cada producto

6.4.2.6 Tamaño de lotes

Se debe introducir para cada producto el tamaño de lote en que se transporta y se procesa.

6.4.2.7 Asignación de Transportadores

El flujo entre cada par de departamentos se le debe asignar un transportador, introduciendo el número de transportador asignado en la intersección del par de departamentos. La diagonal debe mantener vacía.

Departamento\ Departamento	1	2	3	4	5
1					
2					
3					
4					
5					

6.4.2.8 Tiempos de procesamiento esperados

Se debe introducir el tiempo de procesamiento de cada producto en cada departamento en horas por lote.

6.4.2.9 Desviación de tiempo de procesamiento

Se debe introducir la desviación de los tiempos de procesamiento de cada producto en cada departamento en horas por lote.

6.4.2.10 Velocidad de los transportadores

Para cada transportador debe introducirse la velocidad en metros por hora. Este valor se toma como determinístico.

6.4.2.11 Costo consumo de los transportadores

Para cada transportador debe introducirse el costo de trasladarse un metro.

6.4.2.12 Área de los departamentos

Para cada departamento se ingresa el área.

6.4.2.13 Dimensión de la planta

Se debe introducir el largo y el ancho de la planta.

6.4.3 Procesamiento de la información

En éste módulo se procesa la información que se introdujo en los módulos anteriores, para encontrar los beneficios y finalmente evaluar económicamente

Para calcular los beneficios del proyecto se modela la planta como una red abierta de colas $G/G/1$ (distribuciones generales de las tasas de arribos y de procesamiento, con un solo servidor), en la cual se dispone de T transportadores que se encargan del transporte de materiales entre los departamentos.

Para calcular el valor esperado del WIP en el sistema productivo se debe calcular el WIP de cada producto en cada departamento y en cada transportador. Basándose en la ley de *Little*, el WIP depende del tiempo en el departamento CT_{s_j} y de las tasas de arribo de los productos al departamento.

$$WIP_{ij} = CT_{s_j} \times \lambda p_{ij}$$

El efecto de un cambio en el WIP de la planta en el flujo de caja del proyecto se considerará como un cambio en el capital de trabajo.

El costo de manejo de materiales por unidad de tiempo, se encuentra como el producto entre la utilización de cada entidad de manejo de materiales (ut_t) por el costo por unidad de tiempo de cada transportador ($v_t * MHC_{t_t}$)

$$MHC = \sum_{t=1}^T ut_t * v_t * MHC_t$$

El costo de manejo de materiales es un costo que se causa por el consumo de los equipos requeridos en la operación del sistema productivo, por lo que si se reduce o aumenta, con la implementación de un proyecto de redistribución de planta, representa un cambio en los flujos de caja de la empresa. Estos costos serán considerados como flujos de caja del proyecto.

Para evaluar económicamente el proyecto de redistribución de planta se aplica el método del Valor Presente Neto, trayendo al presente los flujos de caja del proyecto, compuesto por los costos y beneficios causados por él.

El procesamiento de este módulo se realiza en una aplicación desarrollada en el programa Matlab. La cual importa la información de los documentos Costos.xls y Beneficios.xls y la procesa generando los resultados.

6.4.4 Módulo de resultados

En este módulo se presentan los resultados de la herramienta, mostrando un informe detallado de la evaluación económica del proyecto y un análisis comparativo de las métricas de rendimiento de la planta actual con la planta propuesta.

El informe incluye los siguientes ítems:

Tabla 5 Resultados

Ítem	Aporte
VPN Total	Valor presente neto del proyecto, es el indicador con el cual se basa la decisión de inversión en el proyecto.
Análisis del VPN	Genera información útil para el usuario sobre que factores están relacionados con el VPN.
Valor del <i>WIP</i> total	Para cada planta se muestran estas métricas, que resultan en criterios secundarios, bajo los cuales la decisión de realizar o no el proyecto de redistribución de planta se puede apoyar. Además esta información es útil para analizar el comportamiento de las plantas y evidenciar oportunidades de mejora en los diseños.
Valor del <i>MHC</i> total	
Utilización de los transportadores	
Utilización de los departamentos	
<i>Lead Time</i> de los productos	

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- En este trabajo de grado se desarrolló una manera estructurada de evaluar económicamente un proyecto de redistribución de planta, analizando los costos y beneficios causados por éste.
- En la literatura se encontró que existen diferentes maneras de calcular el costo de reubicar un departamento. Categorizándose en costos fijos y costos variables. En éste proyecto se propone un método de costeo mixto, donde se incluyen los costos típicos de los proyectos de redistribución de planta y la forma de cuantificarlos.
- Se encontró que los beneficios económicos causados por los tipos de proyectos de redistribución de planta evaluados, se derivan principalmente de la reducción de costo de manejo de materiales y de la reducción de inventario de trabajo en proceso. También se halló que al reducir el *WIP* no necesariamente se reduce el costo de manejo de materiales, mostrando la importancia, que ambos deban ser considerados para evaluar este tipo de proyectos.
- Se desarrolló un modelo de colas que permite considerar los efectos de las variaciones estocásticas en los sistemas productivos, para evaluar el inventario de trabajo en proceso y el costo de manejo de materiales.
- Además de los desarrollos teóricos realizados para evaluar económicamente este tipo de proyectos, se desarrolló una herramienta práctica la cual permite aplicar de manera estructurada lo desarrollado en este proyecto.
- Como resultado adicional de este proyecto se desarrolló un artículo académico donde se presentó una manera de obtener una distribución de planta que permita minimizar los niveles de inventario de trabajo en proceso (*WIP*) para un sistema de producción donde el flujo de materiales se lleva a cabo por medio de diferentes sistemas de manejo de materiales. Donde se demostró que el modelo presentado permite encontrar diseños de planta con mejor desempeño en este indicador que los encontrados por medio de un modelo que considere un solo sistema de manejo de materiales.

7.2 FUTURA INVESTIGACIÓN

Este proyecto reveló, entre otras cosas, que este campo de investigación presenta varias oportunidades para generar avances teóricos y prácticos. Es por esto que se decidió señalar algunos campos de ampliación en donde pueden enfocarse futuras investigaciones y cuyo desarrollo resultaría en un aporte significativo al campo.

En primera instancia, se recomienda extender la metodología aquí desarrollada a otros tipos de proyectos de redistribución. Esto ampliaría el campo de aplicación a proyectos que incluyan cambios en el sistema de producción. Para esto deben considerarse costos adicionales así como beneficios adicionales y es posible que se afecten otros elementos del flujo de caja de la compañía. En resumen, debe analizarse el impacto de estas consideraciones sobre el desarrollo que se hizo a cada uno de los objetivos de este proyecto.

De manera más ambiciosa, se identificó la oportunidad de desarrollar un modelo de generación de distribuciones de planta utilizando como valor objetivo el VPN del proyecto de redistribución que se debería llevar a cabo para obtenerlas. Este modelo presenta, de manera anticipada, diferentes problemas para su desarrollo y aplicación debido a la complejidad de formular los diferentes costos y beneficios en términos de la distribución de planta. Aun así, se consideró que el aporte que podría generar un modelo de este tipo es muy significativo ya que el diseño de la planta es generado pensando en la viabilidad económica que tendría y no solo en indicadores de rendimiento operativo como tradicionalmente se hace.

En relación con el modelo de colas presentado para hallar los beneficios del proyecto, cabe señalar que existen también varias oportunidades de investigación para aumentarle la aproximación a la realidad y el campo de aplicación. Para esto se puede empezar por relajar los diferentes supuestos que se tuvieron en cuenta para la simplificación del problema. Uno de estos supuestos que se consideró que limitaba la aplicación del modelo es el efecto de la diferencia entre los tamaños de lote de producción y las unidades de carga. En muchos sistemas productivos, los productos no siempre son procesados y transportados por unidad o en lotes del mismo tamaño a través de todo el proceso. Esto hace que la aplicación de este modelo no represente de manera fiel lo que sucede en ese tipo de sistemas.

Por último, se consideró que un aporte no esperado de este proyecto fue que, además de evaluar económicamente el proyecto de redistribución, se brinda información al planeador sobre las condiciones de operación esperadas del sistema productivo. Uno de estos datos es el nivel de WIP esperado en cada departamento. Esta información puede revelar problemas de capacidad que pueden resolverse antes de llevar a cabo el proyecto. También es importante tener en cuenta estos niveles de inventario en el diseño de los departamentos ya que no

tener en cuenta este requerimiento de espacio puede generar que el material tenga que ser almacenado en otro lugar perjudicando la eficiencia del manejo de materiales o que se generen bloqueos por material almacenado en pasillos o zonas de flujo. Una oportunidad de investigación aparece al poder incluir este tipo de consideraciones en el diseño de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

ABEDZADEH, Mostafa, Mostafa Mazinani, Nazanin Moradinasab, y Emad Roghanian. Parallel variable neighborhood search for solving fuzzy multi-objective dynamic facility layout problem. En: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012: 1-15.

ACERO PALACIOS, Luis Carlos. Ingeniería de Métodos, movimientos y tiempos. Bogotá: Ecoe Ediciones. 2009.132 p.

ADEROBA, Adeyemi. A sequential model for concurrent expansion in machinery and buildings using reinvested earnings. En: Integrated Manufacturing Systems, nº 4 (1997): 223-230.

AFENTAKIS, P. A Loop Layout Design Problem For Flexible Manufacturing Systems. En: International Journal Of Flexible Manufacturing Systems, 1989: 143-175.

ALQUILANO, Chase Jacobs. Administración de la Producción y Operaciones; 10 ed. MC. Graw Hill, 2005. 374 p.

ALVARADO, Angelica Maria. Diseño de la distribución de planta para la optimización de la producción en la empresa Colombiana de Fibras Plásticas. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 2006.

ALZATE, Ana Lucía y CORTÉS, Mónica. Propuesta de mejoramiento del sistema logístico del aprovisionamiento de materiales para la línea de jabón puro en la planta II de Varela S.A. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2001.

ARBELAEZ, Leonardo Andrés. Optimización de los espacios de la planta y cumplimiento de entregas. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 2001.

ARBOLEDA, Ana Milena. Mejoramiento de la productividad en la fabricación de cabos para herramientas agroindustriales Impromaderas Ltda. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1997.

ARELLANO, Carlos y CASTRO, Andrés. Propuesta de un modelo de redistribución de planta y mejoramiento de la calidad para una línea de producción de tableros laminados de madera. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 1999.

ARISTIZABAL, Libia y MONTAÑO, Juan Carlos. Propuesta de una nueva distribución de planta para Cuadernos Escolares S.A. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 2001.

ARMSTRONG, Michael. A Handbook of Management Techniques. A Comprehensive guide to achieving managerial excellence & improved decision making. 3 ed. 2006. 185 p.

ARROYAVE, Omar y ROZENBOIM. Propuesta de redistribución en planta para una empresa en la industria de la confección. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 1997.

ASKIN, R., y A. KRISHT. Optimal Operation Of Manufacturing Systems With Controlled Work-In-Process Levels. En: International Journal Of Production Economy, 1994: 1637-1653.

BAI, S., Y S. GERSHWIN. Scheduling Manufacturing Systems With Work-In-Process Inventory Control: Multiple-Part-Type Systems. En: International Journal Of Production Research, 1994: 365-386.

BALAKRISHAN, Jaydeep, Chun Hung Cheng, y Daniel G. Conway. An improved pair-wise exchange heuristic for the dynamic plant layout problem.En: International Journal of Production Research, nº 13 (2000): 3067-3077.

BALAKRISHAN, Jaydeep, y Chun Hung Cheng. Dynamic cellular manufacturing under multiperiod planning horizons.En: Journal of Manufacturing Technology Management, nº 5 (2005): 516-530.

BALAKRISHAN, Jaydeep, y Chun Hung Cheng. The dynamic plant layout problem: Incorporating rolling horizons and forecast uncertainty.En: Omega, nº 37 (2009): 165-177.

BALAKRISHAN, Jaydeep. Dynamic Layout Algorithms: A State-of-the-art Survey.En: Omega, nº 4 (1998): 507-521.

BAYKASOGLU, Adil, y Nabil N.Z. Gindy. A simulated annealing algorithm for dynamic layout problem.En: Computers & Operations Research, nº 28 (2001): 1403-1426.

BECERRA, Tania y TORRES, Fabián. Propuesta de la distribución de planta de una empresa productora de equipos de refrigeración, exhibición y almacenamiento de alimentos y bebidas para el mayor aprovechamiento de espacio físico y mejoramiento de la producción. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad de San Buenaventura, 2006.

BELLO, Juan Fernando y MARQUEZ, Ligia Marcela. Desarrollo de una herramienta de evaluación y diagnóstico de la distribución de planta para las micro y pequeñas empresas manufactureras de la ciudad de Cali y su área de influencia. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2004.

BENJAAFAR, Saifallah. Design Of Manufacturing Plant Layouts With Queuing Effects . En: IEEE International Conference On Robotics And Automation. Leuven: IEEE, 1998. 260-265.

BOCANEGRA, Paola Andrea y DURÁN, Silvia. Propuesta para el mejoramiento del sistema de producción de la fumigadora mitto, mediante la aplicación de la teoría de restricciones. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2002.

BORRERO, Marco y CHERES, León. Redistribución de planta y gestión de las operaciones en el área de alambres esmaltados en Cables S.A. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 1999.

BRAGLIA, M. Optimization Of A Simulated-Annealing-Based Heuristic For Single Row Machine Layout Problem By Genetic Algorithm. En: International Transactions In Operational Research, 1996: 37-49.

BRAGLIA, Marcelo; SIMONE, Zanoni, y ZAVANELLA, Lucio. Layout design in dynamic environments: analytical issues. En: International Transactions in Operational Research, nº 12 (2005): 1-19.

CAMACHO, Carolina y GUZMÁN, Claudia Marcela. Propuesta de un diseño para el montaje industrial de la planta de abono orgánico de Cavasa. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2002.

CARCÍA, Juan y BONILLA, Alberto. Propuesta para la redistribución de planta en una empresa de producción y montaje de carrocerías de estacas y furgones. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 1998.

CARDOZO, Flor M. Laboratorio de diseño y distribución en planta rama industrial del plástico. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1989.

CASTAÑEDA, Velasco. Proyecto de redistribución de planta y medición del trabajo en la empresa Resortes Hercules, S.A. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad del Valle, 1987.

CASTRO, Sánchez y EDUARDO, Hugo. Evaluación del proyecto de ensanche de planta de la empresa confecciones eléctricas Ltda. Trabajo de grado Administración de Empresas. Cali, Colombia: Universidad Libre, 1990.

CHEN, G. Y., y K. J. Rogers. Proposition of Two Multiple Criteria Models Applied to Dynamic Multi-objective Facility Layout Problem Based On Ant Colony Optimization.En: 2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Hong Kong: IEEE, 2009. 1553-1557.

CHEN, Gary Y. Multi-objective Evaluation of Dynamic Facility Layout Using Ant Colony Optimization.En: PhD Thesis, University of Arlington, 2007: 1-7.

CHEN, Gary, y Jamie Rogers. Managing Dynamic Facility Layout with Multiple Objectives.En: PICMET 2009 Proceedings. Portland: PICMET, 2009. 1175-1184.

CHEN, Mingyuan. A mathematical programming model for system reconfiguration in a dynamic cellular manufacturing environment.En: Annals of Operations Research, n° 77 (1998): 109-128.

CHEN, T. M., C. C. Chen, y S. P. Chuang. A simulated annealing-based approach for dynamic facility planning.En: Industrial Engineering and Engineering Management, 2011: 1291-1294.

CIGANOVIC, Renato y TATES, Mikael. A model for assessing cost effectiveness of facility layouts- A case study. Tesis de Grado. Smaland: Växjö University, 2006.

CORRY, Paul, y Erhan Kozan. Ant Colony Optimisation for Machine Layout Problems.En: Computational Optimisation and Applications, n° 3 (2004): 287.

CORTES, Judy y ROJAS, OSCAR. Propuesta de cambio en el sistema de producción para ajustarse a las condiciones cambiantes del mercado en la empresa Laboratorios Dermanat S.A. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 2008.

CUARTAS, Edilson. Desarrollo e implementación de un laboratorio de distribución en planta en una fabrica de confecciones. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1992.

CURRY, Guy L., y RICHARD, M. Feldman. Manufacturing Systems Modeling And Analysis. New York: Springer, 2009.

DA SILVA, Geiza Cristina, Laura Bahiense, Luiz Satoru Ochi, y Paulo Oswaldo Boaventura-Netto. The dynamic space allocation problem: Applying hybrid GRASP and Tabu search metaheuristics.En: Computers & Operations Research, n° 39 (2012): 671-677.

DONG, Ming, Chang Wu, y Forest Hou. Shortest path based simulated annealing algorithm for dynamic facility layout problem under dynamic business environment.En: Expert Systems with Applications, n° 36 (2009): 11221-11232.

DUNKER, Thomas, Gunter Radons, y Engelbert Westkamper. Combining evolutionary computation and dynamic programming for solving a dynamic facility layout problem. En: European Journal of Operational Research, nº 165 (2005): 55-69.

DWERI, F., y F. MEIER, A.. Application Of Fuzzy Decision-Making In Facilities Layout Planning. En: International Journal Of Production Research, 1996: 3207-3225.

ECHEVERRY, Andrés Felipe y MAFLA, Juan Pablo. Propuesta de mejoramiento de la estructura física y productiva en Industrias Panky. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2002.

EL-RAYES, Khaled, y HISHAM, Said. Dynamic Site Layout Planning Using Approximate Dynamic Programming. En: Journal of Computing in Civil Engineering, 2009: 119-127.

EREL, E., J.B. Ghosh, y J.T. Simon. New heuristic for the dynamic layout problem. En: Journal of the Operational Research Society, nº 54 (2003): 1275-1282.

ESCOBAR, Vanessa y MORA, Alberto. Propuesta e implementación de la distribución en planta para mejorar la eficiencia, productividad y rendimiento de una industria de muebles en hierro forjado y madera de la ciudad de Cali. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad de San Buenaventura, 2002.

FERRIGO, Giovanna Paola. Restructuración e implementación del área productiva de una empresa manufacturera. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1996.

FLÓREZ, Diana Marcela y CHARRY , Diana Marcela. Análisis y propuesta para un plan de mejoramiento de la producción en la empresa de muebles metálicos Jairo Arena. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2001.

FLÓREZ, Gustavo Adolfo y PARRADO, Isabel Cristina. Propuesta de mejoramiento para la distribución de planta de una empresa manufacturera. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2011.

FONSECA, Juan Carlos y HERRERA, Luis. Mejoramiento de la productividad y competitividad en la fabricación de artículos de marroquinería mediante la redistribución en planta de la microempresa Casta Brava E.U. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad de San Buenaventura, 2004.

FU, Michael, y KAKU, Bharat. Minimizing Work-In-Process And Material Handling In The Facilities Layout Problem. En: IIE Transactions, 1997: 1-29.

GARCÉS, Daniel. Propuesta de mejoramiento continuo en el proceso de producción de hielo a través de la aplicación de las herramientas de Lean Manufacturing. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad de San Buenaventura, 1989.

GARCÉS, Margarita y GIRALDO, Verónica. Propuestas de reacondicionamiento de la planta física de la Pontificia Universidad Javeriana seccional Cali, con el propósito de mejorar la calidad de vida de sus integrantes. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 2004.

GIRALDO, Nestor. Nueva estructura de administración de salarios, distribución en planta y seguridad industrial en muebles Monalisa Ltda. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1980.

GÓMEZ, Alejandro y PAGANESSI, Juan Tiberio. Modelo de mejoramiento para centros de almacenaje y distribución como base para la implementación de las mejores prácticas logísticas en empresas de consumo masivo. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2009.

GOMEZ, Ramón Elías. Estudio de distribución en planta, seguridad e higiene industrial en la central de clasificación Adpostal R.C. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1990.

GONZÁLEZ, Lizette Joanna y OROZCO, Carolina. Propuesta de mejoramiento para el proceso de mezclas físicas de una empresa del sector agroindustrial. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2005.

GOTZE, Uwe; NORTHCOTT, Deryl y SCHUSTER, Peter. Investment Appraisal, Methods and Models. Alemania: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

GUERRERO, María Alejandra. Rediseño y optimización de los flujos de materiales en una empresa del sector. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 2005.

GUEVARA, Andrés y MENESES, Fausto. Propuesta de mejoramiento de la capacidad de producción de industrias Roler Vita Ave, rediseñando la distribución de planta Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 1999.

GUO, Ruey-Shan; CHIANG, David y PAI, Fan-Yun. A WIP-Based Exception-Management Model For Integrated Circuit Back-End Production Processes. En: International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 2007: 1263-1274.

GUTIERREZ, Humberto, y Román de la Vara. Análisis y diseño de experimentos. México: McGraw-Hil, 2008.

GUTIERREZ, Luis y GALLEGO, John. Auditoria en BPM del casino administrativo del Ingenio Providencia con base en el decreto 3075 de 1997. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad de San Buenaventura, 2009.

GUTIERREZ, Realpe. Diseño y/o selección de equipos para la redistribución de agua industrial y agua blanca en la área de maquinas de Propal Planta 1. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali-Colombia: Universidad del Valle, 1998.

HENAO, Pamela y RENGIFO, Marcelo Andrés. Plan de mejoramiento del sistema de producción para una empresa del sector metalmecánico de la ciudad de Cali. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2006.

HERAGU, Sunderesh. Facilities Design. Lincoln, NE: iUniverse, 2006.

HERRERA, Juan y MURCIA, Alberto. Propuesta de mejoramiento a los procesos críticos de valor a la empresa Tecnoplast Ltda. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 2000.

HICKS, P., y LOWAN, T.. CRAFT-M For Layout Re-Arrangement. En:Industrial Engineering, 1976: 30-35.

HITCHINGS, G. G. Control, Redundancy, and Change In Layout Systems. En: IIE Transactions. Taylor & Francis Group. 1970. Vol.2. p.253-262.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Trabajos escritos: presentación y referencias bibliográficas. Sexta actualización. Santafé de Bogotá D.C. junio de 2010.

JARABA, Javier. Mejoramiento de las operaciones de producción de botones y redistribución en planta de la empresa. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1996.

JARAMILLO, J. R., y A. R. McKendall Jr. Dynamic Extended Facility Lyout Problem.En: IERC Annual Conference. Houston: IIE, 2004. 1-6.

JARAMILLO, J.R., y A.R. McKendall Jr. The generalised machine layout problem.En: International Journal of Production Research, nº 16 (2010): 4845-4859.

JARAMILLO, Juan. A Tabu Search Approach for the Dynamic Space Allocation Problem. Tesis de maestría de ciencias en Ingeniería Industrial. Virginia: West Virginia University. 2002. 98 p.

JARAMILLO, Ricardo y PERLAZA, Mónica. Propuesta de rediseño de planta de una empresa productora de pan Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 1998.

JIMENEZ, Cantor. Estudio de distribución en planta y manejo de materiales en el almacén de producto terminado en industrias Cato S.A.. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad del Valle, 1993.

JITHAVECH, Id, y Krishna Kumar Krishnan. A simulation-based approach for risk assessment of facility layout designs under stochastic product demands.En: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, n° 49\ (2010): 27-40.

JITHAVECH, Id. Facility layout design considering risk for single-period and multiple-period cases. Tesis de Doctorado en Filosofía. Kansas: Wichita State University, 2008.

JOLAI, Fariborz, Mohammad Taghipour, y Babak Javadi. A variable neighborhood binary particle swarm algorithm for cell layout problem.En: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, n° 55 (2011): 327-339.

KIA, Reza. A simulated annealing for solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system.En: Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2011: 1113-1117.

KOCHHAR, J. S., y S. S. Heragu. Facility layout design in a changing environment.En: International Journal of Production Research 37, n° 11 (1999): 2429-2446.

KRAMER, Wolfgang, y LAGENBACH-BELZ, Manfred. Approximate Formulae For The Delay In The Queueing System GI/G/1. En: Congressbook, Eighth Int. Teletraffic Cong., 1976.

KRISHNAN, K. K., S. H. Cheragi, y C. N. Nayak. Solving Dynamic Facility Layout Problems Using Dynamic Form Between Charts.En: IIE Annual Conference. Proceedings. Norcross: Institute of Industrial Engineers - Publisher, 2006. 1-6.

KRISHNAN, Krishna K., Id Jithavech, y Haitao Liao. Mitigation of risk in facility layout design for single and multi-period problems.En: International Journal of Production Research, n° 21 (2009): 5911-5940.

KULTUREL-Konak, Sadan, Alice E. Smith, y Bryan A. Norman. Bi-objective facility expansion and relayout considering monuments.En: IIE Transactions, n° 39 (2007): 747-761.

KULTUREL-KONAK, Sadan. Approaches to uncertainties in facility layout problems: Perspectives at the beginning of the 21st Century. En: Journal of Intelligent Manufacturing. Springer. Julio 2007. Vol.18.p. 273-284.

KULTUREL-Konak, Sadan. Approaches to uncertainties in facility layout problems: Perspectives at the beginning of the 21st Century. En: Journal of Intelligent Manufacturing, nº 18 (2007): 273-284.

KULTUREL-KONAK, Sadan; SMITH, Alice E. y NORMAN, Bryan A. Bi-objective facility expansion and relayout considering monuments. En: IIE Transactions. 2007. Vol. 39, p. 747–761.

LACKSONEN, T. A. Preprocessing for static and dynamic facility layout problems. En: International Journal of Production Research, nº 4 (1997): 1095-1106.

LACKSONEN, T. A., y E. Emory Ensore Jr. Quadratic assignment algorithms for the dynamic layout problem. En: International Journal of Production Research, nº 3 (1993): 503-517.

LEMOS, Marcela y RODRÍGUEZ, Viviana Andrea. Propuesta de mejoramiento en el área de producción de una empresa de alimentos del sector confitero. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2002.

LI, W., y J. M. Smith. Stochastic Quadratic Assignment Problems. En: Quadratic Assignment and Related Problems, DIMACS Series Indiscrete Mathematics, 1994: 221-236.

LITTLE, J. D. C. A Proof Of The Queuing Formula $L=\lambda w$. En: Operations Research 9, Nº 3 (1961): 383-387.

LONDOÑO, Andrea y ORTIZ, Gustavo. Propuesta de un sistema de buenas prácticas de manufactura en una empresa productora y distribuidora de productos químicos. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 2000.

LOZADA, Paola y PINEDA, Hugo. Adecuación de una nueva línea de producción para una planta productora de estibas de madera Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 2000.

MA, Hanwu, y Dengfan Zhang. The Dynamics Facility Layout Study Based On Cellular Manufacturing. En: 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Changsha City: IEEE, 2010. 862-865.

MARIDUEÑA, Sara y POSADA, Alejandro. Propuesta de un plan de mejoramiento integral para el proceso productivo de la planta de pollo único Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 1999.

MARTINEZ, Betty del Carmen. Diseño de un modelo de mejoramiento en el área de producción en la empresa metalmecánica industrias Herba. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1992.

MASQUITA, Manuela y CANCHIMBO, Lucia. Propuesta de aplicación de las herramientas de manufactura esbelta en el mejoramiento del proceso productivo de una empresa del sector alimentos. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad de San Buenaventura, 2005.

MAZINANI, Mostafa, Mostafa Abedzadeh, y Navid Moheballi. Dynamic facility layout problem based on flexible bay structure and solving by genetic algorithm.En: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012: 1-15.

MCKENDALL Jr., Alan R., Jin Shang, y Saravanan Kuppusamy. Simulated annealing heuristics for the dynamic facility layout problem.En: Computers & Operations Research, nº 33 (2006): 2431-2444.

MCKENDALL Jr.; ALAN, R., y SHANG, Jin. Hybrid ant systems for the dynamic facility layout problem.En: Computers & Operations Research, nº 33 (2006): 790-803.

MCKENDALL, Jr.; ALAN R., y HAKOBYAN, Artak. Heuristics for the dynamic facility layout problem with unequal-area departments.En: European Journal of Operational Research, nº 201 (2010): 171-182.

MCKENDALL, Jr.; ALAN, R.; SHANG, Jin, Y KUPPUSAMY, Saravanan. Simulated Annealing Heuristics For The Dynamic Facility Layout Problem. En:Computers & Operations Research, Nº 33 (2006): 2431-2444.

MELLER, R., V. Narayanan, y P. Vance. Optimal facility layout design.En: Operations Research Letters, 1999: 117-127.

MELLER, R.; NARAYANAN, V. y VANCE, P.. Optimal Facility Layout Design. En: Operations Research Letters, 1999: 117-127.

MELLER, Russell y KAI-YIN, Gau.: The Facility Layout Problem: Recent And Emerging Trends And Perspectives. En Journal Of Manufacturing Systems, 1996: 351-366.

MELLER, Russell, y Gau Kai-Yin. The Facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives.En: Journal of Manufacturing Systems, 1996: 351-366.

MENG, G.; HERAGU S., y ZIJM, H.. Reconfigurable Layout Problem. En: International Journal Of Production Research, N° 22 (2004): 4709-4729.

MONTERO, Carolina y SARRIA, Pilar. Propuestas para el mejoramiento del sistema de distribución física en la empresa productora de alimentos populares Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 1998.

MOSLEMIPOUR, Ghorbanali, y. LEE, T. S. Intelligent design of a dynamic machine layout in uncertain environment of flexible manufacturing systems.En: Journal of Intelligent Manufacturing, 2011: 1-12.

MUÑOZ, Andrés Felipe. Distribución en planta para el mejoramiento y optimización del almacén de la subdirección de suministros del Hospital Universitario del Valle "Evaristo García" E.S. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 2006.

MUÑOZ, Gloria. Modelo de un sistema de distribución en planta e inventario en industrias Ocampo. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1990.

MUTHER, Richard y CABRE, Carmelo. Distribución en planta, 4 ed. 1981.

NICOT, Jean y VICTORIA, Valeska. Propuesta para la reducción del tiempo de flujo de proceso en una planta productora de libros Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 2000.

NIEVA, Monsalve Distribución y mejoramiento de la planta de fundición en Rua & Murgueitio Ltda. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad del Valle, 2006.

OSORIO, Jiménez. Estudio de redistribución en planta, manejo de materiales e higiene y seguridad industrial en una empresa de reconstrucción y rectificación de motores. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad del Valle, 1994.

OSORIO, Juan Carlos. Diseño de una propuesta para incrementar la capacidad en el área de producción de cilindros de rotograbado en una planta de artes. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad de San Buenaventura, 2003.

OSSA, Gutiérrez y MONROY, Estupinan. Estudio de mejoramiento en la fábrica Dulces Colombina S.A., sección de envoltura y empaque de dulcería: redistribución de la planta, manual de funciones y control del almacenamiento. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad del Valle, 1993.

PARK, Chan S. y SHARP-BETTE, Gunter P. Advanced Engineering Economics. John Wiley and Sons, Inc. 1990. 4 p.

PARRA, Sandra Carolina. Análisis y propuestas de mejora para la bodega de Gases de Occidente. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 2008.

PATINO, Sergio. Redistribución de los recursos productivos en Consazoni. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1990.

PEÑA, Martínez y LARGO, Pinzón Propuesta de rediseño de una planta tipo taller con base en la automatización de algunos procesos en una línea de producción. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad del Valle, 1990.

PÉREZ, Juliana y ZAMBRANO, Chávez. Propuesta para rediseñar y estandarizar el área de fabricación de puentes Toyota en la empresa Fanalca S.A. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 1998.

PHILLIPS, Edward. Manufacturing Plant Layout, Fundamentals and fine points of optimum facility design. SME. 1997. 43 p.

PILLAI, V. Madhusudanan, Irappa Basappa Hunagund, y Krishna K. Krishnan. Design of robust layout for Dynamic Plant Layout Problems. En: Computers & Industrial Engineering, nº 61 (2011): 813-823.

POSADA, Adriana y TABARES, Carmen. Estudio de factibilidad para la ampliación de una planta de calcinación. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 1997.

PRADA, Karina. Redistribución del área de empaque y reducción de inventarios de la línea 22 en una empresa del sector farmacéutico. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 2006.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Guía para los fundamentos de la dirección de proyectos. 4 ed. Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, 2008. p 146-165.

RAMAN, Dhamodharan; NAGALINGAM, Sev V., y GURD, Bruce . A Genetic Algorithm And Queuing Theory Based Methodology For Facilities Layout Problem. En: International Journal Of Production Research, Nº 20 (2009): 5611-5635.

RAMIREZ, Luis Eduardo y RODRÍGUEZ, Diana. Estudio de factibilidad para la ampliación de una planta comercializadora de productos pesqueros. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad de San Buenaventura, 1989.

RAMÍREZ, Martha y REYES, Johana. Propuesta para el rediseño de un laboratorio químico ideal para optimizar la gestión técnico-administrativa del mismo en una empresa manufacturera del sector cosmético. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 2003.

RAMIREZ, Vega. Un caso de mejoramiento en una planta manufacturera de bienes de consumo aplicando el concepto de T.P.M. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad del Valle, 1995.

RAWABDEH, Ibrahim, y Khaldoun Tahboub. A new heuristic approach for a computer-aided facility layout.En: Journal of Manufacturing Technology Mngement, n° 7 (2006): 962-986.

REZAZEDEH, Hassan, Mehdi Ghazanfari, Mohammad Saidi-Mehrabad, y Seyed Jafar. An extended discrete particle swarm optimization algorithm for the dynamic facility layout problem.En: Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2009: 620-629.

RICO, Vanessa y HERNÁNDEZ, Carlos Arturo. Propuesta de rediseño del proceso para construir subestaciones en la planta de la empresa Electro Potencia Ltda. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 1997.

RIPON, Kazi Shah Nawaz, Kyrre Glette, Mats Hovin, y Jim Torresen. A Genetic Algorithm to Find Pareto-optimal Solutions for the Dynamic Facility Layout Problem with Multiple Objectives.En: ICONIP, 2012: 642-651.

RIPON, KAZI Shah Nawaz, KYRRE Glette, MATS Hovin, y JIM Torresen. Dynamic facility layout problem under uncertainty: a Pareto-optimality based multi-objective evolutionary approach.En: Central European Journal of Computer Science, 2011: 375-386.

RIPON, KAZI Shah Nawaz, KYRRE Glette, MATS Hovin, y JIM Torresen. Dynamic Facility Layout Problem with Hybrid Genetic Algorithm.En: IEEE 9th International Conference on Cybernetic Intelligent Systems. Oslo: IEEE, 2010. 1-6.

RIPON, Kazi Shah Nawaz; KYRRE, Glette, DIRK, Koch; MATS Hovin, y JIM, Torresen. Genetic algorithm using a modified backward pass heuristic for the dynamic facility layout problem.En: PALADYN Journal of Behavioral Robotics, 2011: 164-174.

RIVERA, Cristina y VELASCO, Rodrigo. Alternativas para incrementar la productividad en una empresa productora de tubos de cemento Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 2000.

RIVERA, Mauricio y PERDOMO, Carlos. Evaluación socio-económica del proyecto de ensanche de la planta de trituración del azufre de Industrias Purace S.A. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad de San Buenaventura, 1984.

ROJAS, James. Estudio de distribución en una planta e industrias rebra. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1990.

ROSENBLATT, Meir J. The dynamics of plant layout.En: Management Science, nº 1 (1986): 76-86.

SAHIN, Ramazan, Kadir Ertogral, y Orhan Turkbey. A simulated annealing heuristic for the dynamic layout problem with budget constraint.En: Computers & Industrial Engineering, nº 59 (2012): 308-313.

SAHIN, Ramazan, y Orhan Turkbey. A new hybrid tabu-simulated annealing heuristic for the dynamic facility layout problem.En: International Journal of Production Research, nº 24 (2009): 6855-6873.

SAIDI-MEHRABAD, M., y N. Safaei. A new model of dynamic cell formation by a neural approach.En: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, nº 33 (2007): 1001-1009.

SALAZAR, Andrés Felipe. Propuesta de distribución en planta bietapa en ambientes de manufactura flexible mediante el proceso analítico jerárquico. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 2004.

SANTOS, Eduardo. Rediseño del sistema de producción de la compañía Industria Maderera Arca Ltda. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1996.

SAPAG CHAIN, Nassir y SAPAG CHAIN, Reinaldo. Preparación y evaluación de proyectos. 4 ed. McGraw-Hill, 2003.

SEPHERI, Mohammad y NAHAVAND, Nasim. Critical WIP Loops: A Mechanism For Material Flow Control In Flow Lines. En: International Journal Of Production Research, 2007: 2759-2773.

SHAHBAZI, Ehsan. Mathematical Modeling and Solution Development for "Dynamic Facility Layout Problem" in Job Shop Process Using Meta-heuristic Algorithms.En: 2010 40th International Conference on Computers and Industrial Engineering. Awaji City: IEEE, 2010. 1-6.

SING, S.P y SHARMA, R.R.K. A review of different approaches to facility layout problems. En: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Septiembre, 2006.Vol 30. no. 5-6. p 425-433.

SINGH, S., y SHARMA, R. A Review Of Different Approaches To The Facility Layout Problems. En: International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 2006: 425-433.

SINGH, Surya Prakash. An Approximate Algorithm for Solving Dynamic Facility Layout Problem.En: ICT, 2010: 504-509.

SOTO, Fabio. Distribución de la planta de producción y reestructuración administrativa de café Sevillano Ltda. ubicada en Villavicencio. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1995.

SUNDERESH, Heragu. Facilities Desing. 2 ed. 2006. 3 p.

TIAN, Zengbao, Hua Li, y Jinping Zhao. Optimization of Continuous Dynamic Facility Layout Problem with Budget Constraints.En: 2010 2nd International Conference on Information Science and Engineering. Hangzhou: IEEE, 2010. 387-390.

TOMPKINS, James y WHITE, John, et al. Planeación de instalaciones. 3 ed. Thomson.

TRUJILLO, Luisa y ECHEVERRI, Enrique. Propuesta de mejoramiento para la distribución en planta de la bodega de despachos con énfasis en la implementación de nuevas tecnologías en el almacenamiento y cargue de producto terminado para empresas del sector papelerero. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad de San Buenaventura, 2005.

URBAN, Timothy L. Solution procedures for the dynamic facility layout problem.En: Annals of Operations Research, nº 76 (1998): 323-342.

VÁSQUEZ, Laura y RODRÍGUEZ, María Andrea. Guía para la Realización de Proyectos de Redistribución de Planta en Cali. Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial. Cali, Colombia: Universidad Icesi. Facultad de Ingeniería. 2012

VALENCIA, Andrés y FINA, Francisco. Propuesta de mejoramiento de los procesos de almacenamiento y separación de mercancía en el depósito central de una empresa editora y distribuidora de libros. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Pontificia Javeriana, 2000.

VIJAYVARGIYA, Mool. Developing a mathematical model for scheduling re-layout projects. Tesis de maestría en ciencias. Ohio: Ohio University. Facultad de Ingeniería y Tecnología, 1994.

VILLAREAL, Luz Marieth. Propuesta de mejoramiento en el área de producción Expoplata. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 2005.

VILLOTA, Héctor Fabio. Estudio de distribución en planta seguridad e higiene industrial en la empresa transformadores de Colombia. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 1991.

WANG, Chi-Tai. Static and dynamic facility layout problems.En: PhD Thesis, University of Michigan, 1999: 1-21.

WANG, Lihui. Combining facility layout redesign and dynamic routing for job-shop assembly operations.En: Industrial Engineering and Engineering Management, 2011: 1-6.

YANG, Chang-Lin, y Shan-Ping Chuang. A genetic algorithm for dynamic facility planning in job shop manufacturing.En: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, nº 52 (2011): 303-309.

ZOUEIN, P. P., y I. D. TOMMELEIN. Dynamic Layout Planning Using a Hybrid Incremental Solution Method.En: Journal of Construction Engineering and Management, 1999: 400-408.

ANEXOS

Anexo A: Métodos de evaluación aplicados en los trabajos de grado de proyectos de redistribución de planta en las universidades de Cali.

No.	Tesis	Tipo de Evaluación						
		No-Evaluación	Vpn	Tir	Pri	Punto de equilibrio	beneficio-costos	por revisar
1	Diseño de una propuesta para incrementar la capacidad en el área de producción de cilindros de rotograbados en una planta de artes gráficas	x						
2	auditoria en bpm del casino administración del Ingenio Providencia con base en el decreto 3075 de 1997	x						
3	Propuesta de aplicación de las herramientas de manufactura esbelta en el mejoramiento del proceso productivo de una empresa del sector alimentos		x					
4	Propuesta de mejoramiento continuo en el proceso de producción de hielo a través de la aplicación de las herramientas del lean manufacturing	x						
5	Propuesta de mejoramiento para la distribución en planta de la bodega de despachos con énfasis en la implementación de nuevas tecnologías en el almacenamiento y cargue de producto terminado para las empresas del sector papelerero		x	x				
6	Propuesta de la distribución de planta de una empresa productora de equipos de refrigeración, exhibición y almacenamiento de alimentos y bebidas, para el mayor aprovechamiento de la producción		x	x				
7	Propuesta de implementación de la distribución en planta para mejorar la eficiencia, productividad y rendimientos de una industria en hierro forjado y madera de la ciudad de Cali	x						
8	Mejoramiento de la productividad y competitividad en la fabricación de artículos de marroquinería mediante la redistribución en planta de la microempresa casta brava E.U		x					

9	Estudio de factibilidad para la ampliación de una planta comercializadora de productos pesqueros.		x					
10	Evaluación socio-económica del proyecto de ensanche de la planta de trituración del azufre de Industrias Purace S.A.		x					
11	Propuesta de mejoramiento de los procesos de almacenamiento y separación de mercancía en el depósito central de una empresa editora y distribuidora de libros	x						
12	Propuesta de redistribución en planta para una empresa en la industria de la confección						x	
13	Propuesta de un modelo de redistribución de planta y mejoramiento de la calidad para una línea de producción de tableros laminados de madera		x					
14	Propuesta para la redistribución de planta en una empresa de producción y montaje de carrocerías de estacas y furgones						x	
15	Redistribución de planta y gestión de las operaciones en el área de alambres esmaltados en Cables S.A.	x						
16	Propuesta para la reducción del tiempo de flujo de proceso en una planta productora de libros		x				x	
17	Adecuación de una nueva línea de producción para una planta productora de estibas de madera					x		
18	Alternativas para incrementar la productividad en una empresa productora de tubos de cemento	x						
19	Propuesta de cambio en el sistema de producción para ajustarse a las condiciones cambiantes del mercado en la empresa Laboratorios Dermanat S.A.	x						

20	Propuesta de mejoramiento a los procesos críticos de valor a la empresa Tecnoplast Ltda.		x					
21	Propuesta de mejoramiento de la capacidad de producción de industrias Roler Vita Ave, rediseñando la distribución de planta			x			x	
22	Propuesta de mejoramiento de la gestión de recibo y almacenaje en un centro de almacenamiento y distribución de un laboratorio farmacéutico		x	x			x	
23	Propuesta de mejoramiento del proceso productivo de pasteles en hojaldre y distribución de planta para una empresa del sector alimentos	x						
24	Propuestas para el mejoramiento del sistema de distribución física en la empresa productora de alimentos populares		x	x	x			
25	Propuesta de rediseño de planta de una empresa productora de pan		x					
26	Propuestas de reacondicionamiento de la planta física de la Pontificia Universidad Javeriana seccional Cali, con el propósito de mejorar la calidad de vida de sus integrantes		x	x	x			
27	Propuesta para el rediseño de un laboratorio químico ideal para optimizar la gestión técnico-administrativa del mismo en una empresa manufacturera del sector cosmético	x						
28	Estudio de factibilidad para la ampliación de una planta de calcinación			x				
29	Propuesta de una nueva distribución de planta para Cuadernos Escolares S.A.	x						
30	Propuesta para rediseñar y estandarizar el área de fabricación de puentes Toyota en la empresa Fanalca S.A.	x						

31	Diseño de la distribución de planta para la optimización de la producción en la empresa Colombiana de Fibras Plásticas COLFIBRAS	x						
32	Optimización de los espacios de la planta y cumplimiento de entregas	x						
33	Redistribución del área de empaque y reducción de inventarios de la línea 22 en una empresa del sector farmacéutico	x						
34	Distribución en planta para el mejoramiento y optimización del almacén de la subdirección de suministros del Hospital niversitario del Valle "Evaristo Garcia" E.S.E	x						
35	Propuesta de mejoramiento en el área de producción Expoplata	x						
36	Rediseño y optimización de los flujos de materiales en una empresa del sector plástico	x						
37	Análisis y propuestas de mejora para la bodega de Gases de Occidente	x						
38	Modelo de un sistema de distribución en planta e inventario en industrias Ocampo						x	
39	Mejoramiento de la productividad en la fabricación de cabos para herramientas agroindustriales Impromaderas Ltda..	x						
40	Desarrollo e implementación de un laboratorio de distribución en planta en una fabrica de confecciones	x						
41	Nueva estructura de administración de salarios, distribución en planta y seguridad industrial en muebles Monalisa Ltda	x						

42	Estudio de distribución en planta, seguridad e higiene industrial en la central de clasificación Adpostal		x					
43	Diseño de un modelo de mejoramiento en el área de producción en la empresa metalmecánica industrias Herba. Cali, 1992	x						
44	Patino Corrales, Sergio. Redistribución de los recursos productivos en Consazoni	x						
45	Eduardo. Rediseño del sistema de producción de la compañía Industria Maderera Arca	x						
46	James. Estudio de distribución en una planta e industrias rebra	x						
47	Distribución de la planta de producción y restructuración administrativa de café Sevillano Ltda, ubicada en Villavicencio	x						
48	Hector Fabio. Estudio de distribución en planta seguridad e higiene industrial en la empresa transformadores de Colombia	x						
49	Rediseño de la línea de muebles y colchones de la empresa espumas del Valle						x	
50	Reestructuración e implementación del área productiva de una empresa manufacturera							
51	Propuesta de mejoramiento para la distribución de planta de una empresa manufacturera	x						
52	Plan de mejoramiento del sistema de producción para una empresa del sector metalmecánico de la ciudad de Cali							x

53	Análisis y propuesta para un plan de mejoramiento de la producción en la empresa de muebles metálicos Jairo Arena	x						
54	Propuesta de mejoramiento de la estructura física y productiva en Industrias Panky						x	
55	Un caso de mejoramiento en una planta manufacturera de bienes de consumo aplicando el concepto de T.P.M						x	
56	Distribución y mejoramiento de la planta de fundición en Rua & Murgueitio		x					
57	Estudio de distribución en planta y manejo de materiales en el almacén de producto terminado en industrias Cato S.A	x						
58	Estudio de mejoramiento en la fábrica Dulces Colombina S.A., sección de envoltura y empaque de dulcería	x						
59	Estudio de redistribución en planta, manejo de materiales e higiene y seguridad industrial en una empresa de reconstrucción y rectificación de motores	x						
60	Propuesta de rediseño de una planta tipo taller con base en la automatización de algunos procesos en una línea de producción						x	
61	Proyecto de redistribución de planta y medición del trabajo en la empresa Resortes Hercules						x	
62	Evaluación del proyecto de ensanche de planta de la empresa confecciones electricas Ltda						x	
63	Propuesta de mejoramiento a la empresa unión plástica ltda. en la distribución de su planta de alto tonelaje						x	

Anexo B: MATRIZ DE MARCO LÓGICO

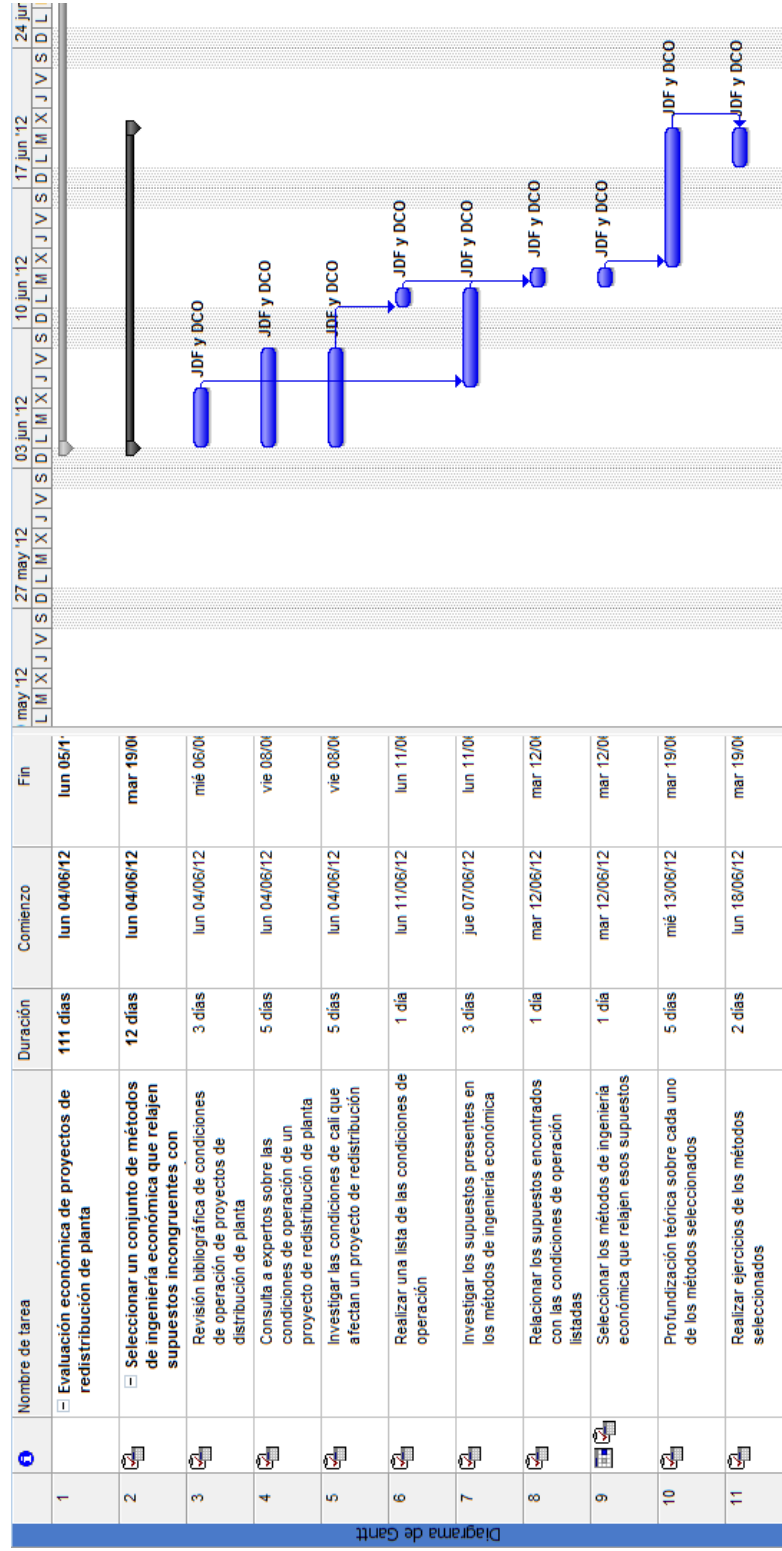
OBJETIVO ESPECÍFICO 1	RESUMEN NARRATIVO	INDICADORES		MEDIOS DE VERIFICACIÓN	SUPUESTOS
		Enunciado	Fórmula de cálculo		
	Seleccionar un conjunto de métodos de ingeniería económica que relajen supuestos incongruentes con proyectos de redistribución de planta.				
Actividad 1	Revisión bibliográfica de condiciones de operación de proyectos de distribución de planta		si/no	verificación directa	Se tendrá acceso a la literatura requerida
Actividad 2	Consulta a expertos sobre las condiciones de operación de un proyecto de redistribución de planta		si/no	constancia de la entrevista	se tendrá acceso a expertos.
Actividad 3	Investigar las condiciones de cali que afectan un proyecto de redistribución		si/no	verificación directa	
Actividad 4	Realizar una lista de las condiciones de operación		si/no	lista de condiciones	las condiciones listadas son congruentes
Actividad 5	Investigar los supuestos presentes en los métodos de ingeniería económica		si/no	verificación directa	
Actividad 6	Relacionar los supuestos encontrados con las condiciones de operación listadas	porcentaje de condiciones de operación relacionadas	#condiciones relacionadas/# de condiciones listadas	<i>verificación directa</i>	se encontrarán supuestos para alguna de las condiciones
Actividad 7	Seleccionar los métodos de ingeniería económica que relajen esos supuestos		si/no	<i>verificación directa</i>	
Actividad 8	Profundización teórica sobre cada uno de los métodos seleccionados	porcentaje de métodos estudiados	(#métodos estudiados/ #métodos seleccionados)	verificación directa	
Actividad 9	Realizar ejercicios de los métodos seleccionados	porcentaje de ejercicios realizados	(ejercicios realizados / ejercicios propuestos)	solución de los ejercicios	los ejercicios propuestos proporcionarán la habilidad a los investigadores para aplicar los métodos a problemas prácticos

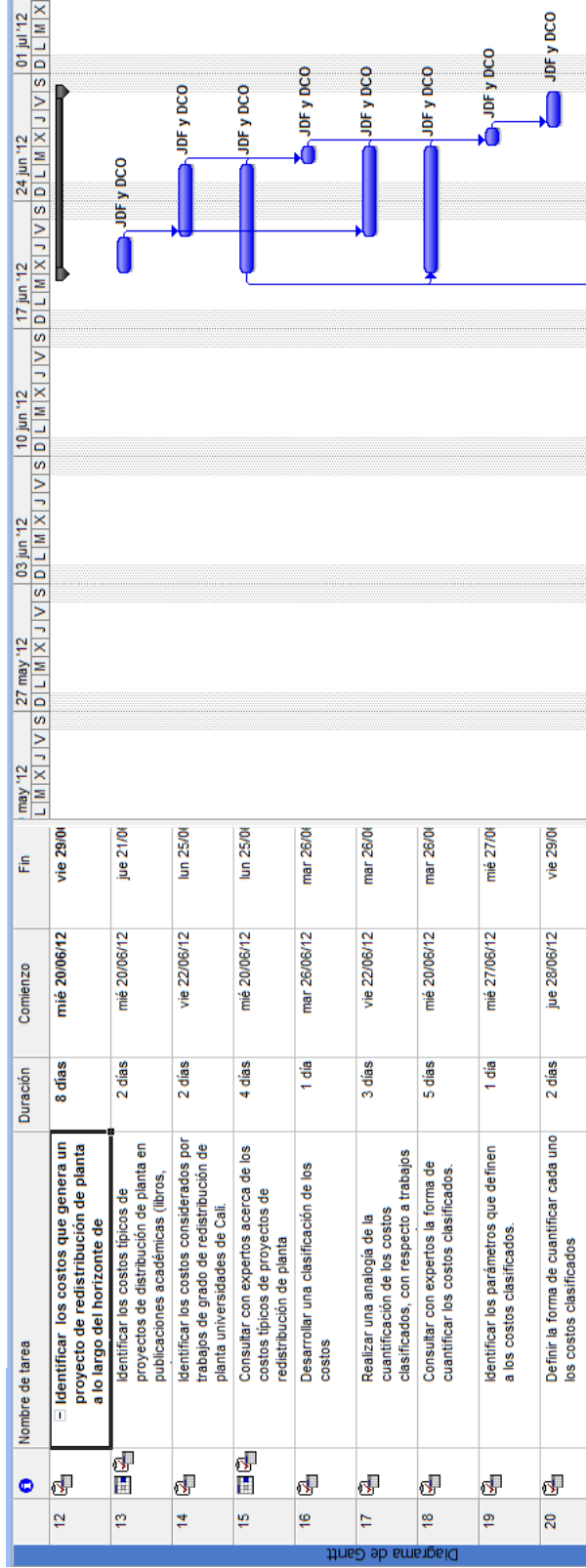
OBJETIVO ESPECÍFICO 2	RESUMEN NARRATIVO	INDICADORES		MEDIOS DE VERIFICACIÓN	SUPUESTOS
		Enunciado	Fórmula de cálculo		
	Identificar los costos que genera un proyecto de redistribución de planta a lo largo del horizonte de planeación.				
Actividad 10	Identificar los costos típicos de proyectos de distribución de planta en publicaciones académicas (libros, artículos y trabajos de grado) y extrapolarlos a proyectos de redistribución de planta.	logro de la identificación	si/no	listado de los costos típicos	Los costos típicos de proyectos de distribución e planta están descritos en publicaciones académicas
Actividad 11	identificar los costos considerados por trabajos de grado de redistribución de planta universidades de Cali.	porcentaje de tesis revisadas	(#tesis revisadas/#tesis identificadas)	lista de costos	se tendrá acceso a las tesis de las universidades.
Actividad 12	Consultar con expertos acerca de los costos típicos de proyectos de redistribución de planta		si/no	lista de costos	se tendrá acceso a expertos.
Actividad 13	Desarrollar una clasificación de los costos		si/no	verificación directa	
Actividad 14	Realizar una analogía de la cuantificación de los costos clasificados, con respecto a trabajos de grado de redistribución.	porcentaje de tesis revisadas	(#tesis revisadas/#tesis identificadas)	verificación directa	
Actividad 15	Consultar con expertos la forma de cuantificar los costos clasificados.		si/no	constancia de la entrevista	se tendrá acceso a expertos.
Actividad 16	Identificar los parámetros que definen a los costos clasificados.	porcentaje de costos parametrizados	#de costos parametrizados/ #costos totales	tabla con los parámetros	los costos se pueden parametrizar
Actividad 17	Definir la forma de cuantificar cada uno los costos clasificados		si/no	verificación directa	

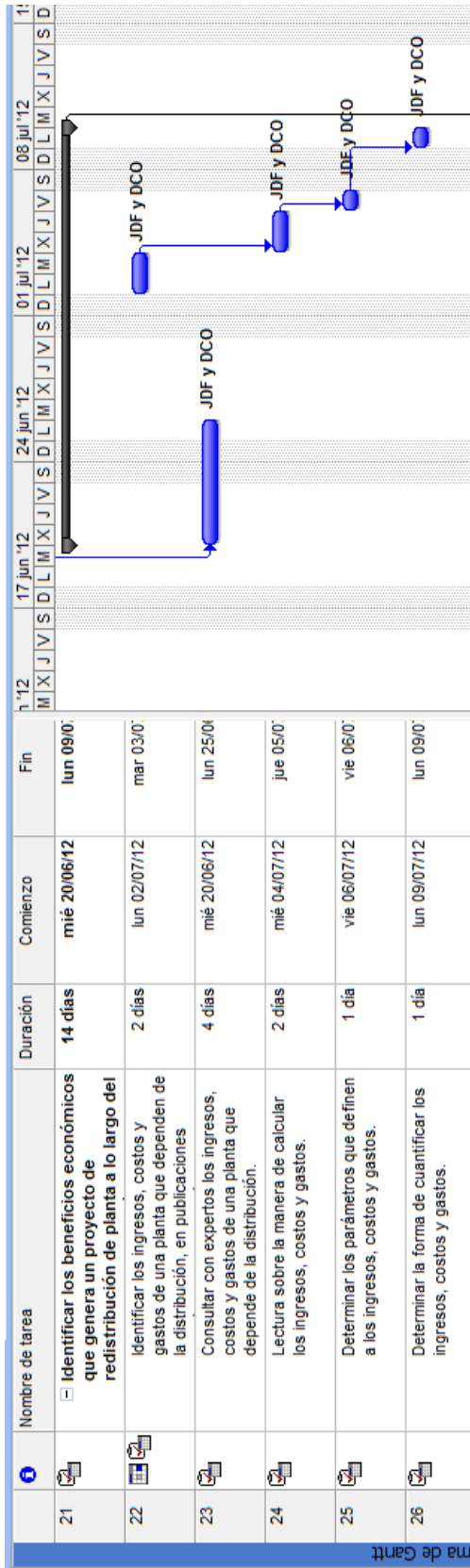
OBJETIVO ESPECÍFICO 3	RESUMEN NARRATIVO	INDICADORES		MEDIOS DE VERIFICACIÓN	SUPUESTOS
		Enunciado	Fórmula de cálculo		
	Identificar los beneficios económicos que genera un proyecto de redistribución de planta a lo largo del horizonte de planeación.				
Actividad 18	Identificar los ingresos, costos y gastos de una planta que dependen de la distribución, en publicaciones académicas (libros, artículos y trabajos de grado).		si/no	lista de ingresos, costos y gastos	se encontrarán ingresos, costos y gastos en las publicaciones académicas
Actividad 19	Consultar con expertos los ingresos, costos y gastos de una planta que depende de la distribución.		si/no	constancia de la entrevista	se tendrá acceso a expertos.
Actividad 20	Lectura sobre la manera de calcular los ingresos, costos y gastos.		si/no	verificación directa	
Actividad 21	Determinar los parámetros que definen a los ingresos, costos y gastos.	porcentaje de ingresos, costos y gastos parametrizados	#de ingresos, costos y gastos parametrizados/ # ingresos, costos y gastos	tabla con los parámetros	los ingresos, costos y gastos se pueden parametrizar
Actividad 22	determinar la forma de cuantificar los ingresos, costos y gastos.		si/no	verificación directa	

OBJETIVO ESPECÍFICO 4	RESUMEN NARRATIVO	INDICADORES		MEDIOS DE VERIFICACIÓN	SUPUESTOS
		Enunciado	Fórmula de cálculo		
	Desarrollar una metodología que adapte cada método de ingeniería económica seleccionado a las condiciones específicas de los proyectos de redistribución de planta.				
Actividad 23	Determinar las entradas de información necesarias para cada uno de los métodos de evaluación económica de proyectos de inversión seleccionados.		si/no	tabla con las entradas de información	
Actividad 24	Definir el tratamiento a aplicar a los datos de entrada.	Porcentaje de datos de entrada tratados	# de entradas tratadas / # de entradas identificadas	verificación directa	El tratamiento de los datos de entrada reflejará su comportamiento
Actividad 25	Elaborar una secuencia de pasos, para transformar la información de entrada en flujos de caja para los diferentes métodos		si/no	Secuencia de pasos	
Actividad 26	Identificar los pasos necesarios para la aplicación de los métodos de evaluación.		si/no	Secuencia de pasos	Los pasos resultarán en la correcta aplicación de cada método
Actividad 27	Elaborar una metodología que describa los pasos para aplicar los métodos de evaluación, a partir de las entradas de información.		si/no	Guía de aplicación de los métodos de evaluación	
Actividad 28	Lectura sobre las opciones para desarrollar un software.	Porcentaje de análisis de las alternativas	# de alternativas analizadas / # de alternativas identificadas	verificación directa	Se encontrará una opción que se ajuste a las necesidades del <i>software</i>
Actividad 29	Seleccionar el lenguaje de programación		si/no	verificación directa	El lenguaje de programación seleccionado suplirá las necesidades del <i>software</i>
Actividad 30	Aprender a programar en el lenguaje seleccionado.		si/no	verificación directa	Los autores lograrán adquirir la habilidad en el tiempo presupuestado
Actividad 31	Programar una herramienta que solicite las entradas de información y ejecute los métodos de evaluación.		si/no	Herramienta funcional	La herramienta cumplirá con el propósito de su programación

Anexo C: Cronograma







ma de Gantt

