



VIII Congreso Universidad Militar Nueva Granada
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA APLICADA**



III Congreso Escuela de Postgrados FAC
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA AERONÁUTICA**



Integración Logística para la industria sostenible





**Escuela de Postgrados
de la Fuerza Aérea
Colombiana**

Director

CR. Javier Neira Peraza

Subdirector General

CR. Miguel Enrique
Restrepo Cabrera

**Comandante Grupo
Académico**

CR. Martin Fernando
Zorrilla Rodríguez

**Comandante Escuadrón
de Educación Superior**

TC. Juan Carlos
Hernández Deckers

**Director de Maestría en
Logística Aeronáutica
(E)**

ST. Jeimmy Nataly
Buitrago Leiva

**Coordinador de
Programa en
Logística Aeronáutica**

ST. Jeimmy Nataly
Buitrago Leiva

**Comandante Escuadrón
de Investigación y
Director de
Publicaciones**

TC. Wilson Jaramillo
García

Coordinadora Editorial

María Carolina Suárez
Sandoval

Corrector de Estilo

Juan Carlos Velásquez

**Memorias
Congreso Internacional
Logística Aeronáutica**

Compiladores

ST. Jeimmy Nataly
Buitrago Leiva
Álvaro Fernando
Moncada Niño, PhD.
Yeisson Alexis Rincón
Cuta; Mg. HSEQ-RSE

Equipo técnico

Dirección del proyecto

ST. Jeimmy Nataly
Buitrago Leiva. EPFAC
Ing. Tirso Forigua, MBA.
UNMG.

**Comité de
Investigación**

Ing. Raymundo
Forradellas, Ph.D.
Argentina
Ing. Lorena Bearzotti,
Ph.D. Chile
Ing. Danilo Sanchez,
Ph.D. Ecuador
Ing. Héctor Carlo, Ph.D.
Puerto Rico
Ing. Hugo Tapia, M.Sc.
Argentina
Eco. Javier Pedro
Moreno. México
Ing. Renata Quemel Pires,
M.Sc. Brasil
Ing. Tirso Forigua, MBA.
Colombia
Ing. Pedro Sánchez,
Ph.D(c). Colombia
Ing. Álvaro Mocada,
Ph.D. Colombia

Lc. Luz Marina Triana,
M.Sc. Colombia
Ing. Yeisson Alexis
Rincón Cuta, M.Sc.
Colombia

**Equipo organizador
EPFAC**

CR. Martin Fernando
Zorrilla Rodríguez.
Comandante Grupo
Académico.
Jeimmy Nataly Buitrago
Leiva. Directora (e)
Maestría en Logística
Aeronáutica.
Yeisson Alexis Rincón
Cuta; Mg. HSEQ-RSE.
Docente Maestría en
Logística Aeronáutica.
Luz Marina Triana, M.Sc.
Docente Maestría en
Logística Aeronáutica.

**Equipo organizador
UMNG**

Ing. CR. José Octavio
Duque; M.Sc. Decano
Facultad de Ingeniería
Ing. Tirso Forigua, MBA.
Ing. Pedro Sánchez,
PhD(c).

Colaboradores

Programas Logística
Aeronáutica
Maestría Logística
Aeronáutica Cohorte II
y III EPFAC.

**Escuadrón de
Investigación EPFAC**

TC. Wilson Jaramillo
García



Entidades

Universidad Militar Nueva Granada
 Corporación de la Industria Aeronáutica Colombiana S.A – CIAC

Autores memorias

Matías J. Coppa,
 Juan Ignacio D'Iorio
 Nahuel Tomassini
 Lucas Sznajderman
 Alejandro Di Bernardi
 Andrés Carlos Bolaños Riesen
 Pedro Alejandro Baziuk

Lorena Bearzotti
 Oscar Díaz Olariaga
 Capitán Carlos Alberto Gómez Cardona
 César Jiménez Lozano
 Ana María Beltrán Zapata
 Rina Valeria Suarez Lozano
 Diana Alejandra Pérez Medina
 Juan David Villarreal Murcia
 Luisa Fernanda Vargas Orjuela
 Wendi Amaris Jerez
 Ana Milena Castellanos

Andrés Felipe Caballero Urrego

Información técnica

Fecha del Congreso: mayo 9 y 10 del 2018.
 Bogotá, D.C.
 Colombia (Suramérica)
 © Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana,

E-ISSN 2539-3251

Periodicidad anual

Sitio web

<https://www.epfac.edu.co/memorias-3>

Mayores informes

Cra. 11 N.º 102-50 Edificio ESDEGUE, Escuadrón de Investigaciones.
 Oficina 411. Bogotá D.C., Colombia. A.A.110111
 Teléfonos (057-1) 637 8927 – 6206518 Ext. 1700, 1719, 1722.
 Correo electrónico: cienciapoderaaereo@gmail.com

Está permitida la reproducción total o parcial de los escritos aquí contenidos para uso personal o con fines académicos e investigativos, siempre y cuando se haga la respectiva cita o referencia a la ponencia, autor(es), y a la publicación de las Memorias "La logística y su impacto en el sector aeronáutico", organizado por la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana. Bogotá, Colombia (Suramérica). En caso de querer reproducir esta obra para otros fines, en cualquiera de sus formatos, deberá contar con el permiso escrito de la entidad editora.

Copyright (c) 2018. Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.



VIII Congreso Universidad Militar Nueva Granada
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA APLICADA**



III Congreso Escuela de Postgrados FAC
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA AERONÁUTICA**



**ESCUELA DE POSTGRADOS DE LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA
CAPITÁN JOSÉ EDMUNDO SANDOVAL
PROGRAMA EN LOGÍSTICA AERONÁUTICA
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA AERONÁUTICA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

Memorias

III Congreso Internacional de Logística Aeronáutica

Vol. 3. Enero – diciembre 2018 / pp. 245
Mayo 9 y 10 de 2018

Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana
Bogotá, D.C., Colombia (Suramérica)
2018



Tabla de contenido

Presentación	8
CAPÍTULO I. Ponencias Internacionales.....	9
<i>Análisis de emisiones gaseosas y estudio comparativo de CO2 en aeropuertos aerocomerciales argentinos</i>	10
Resumen.....	10
Introducción.....	11
Marco teórico	12
Metodología	20
Aeropuertos analizados.....	20
Resultados	27
Conclusiones.....	32
Referencias	33
<i>Interacción del transporte aéreo en las operaciones multimodales. Proyecto multimodal de perecederos vía Panamá</i>	36
Resumen.....	36
Introducción.....	36
Metodología y marco de referencia.....	37
Planteamiento del escenario	37
Origen del proyecto.....	38
Los actores.....	38
Enfoque del proyecto	38
Enfoque comercial	39
Enfoque operativo.....	39
Mapeo de procesos.....	39
Prueba del concepto	40
Resultados y beneficios	40
Aporte del transporte aéreo	41
Conclusiones.....	41
<i>Desafíos estratégicos en logística: la gestión de la confiabilidad humana en la cadena de suministros</i>	42
Resumen.....	42
Introducción.....	42
Marcos conceptuales	43
Taxonomía de errores humanos y riesgos de interrupción del flujo de materiales	50
Estrategias de disminución de riesgos: recomendaciones de diseño y rediseño.....	55
De la confiabilidad humana en centrales nucleares a la gestión de riesgos en la cadena de suministros	60
Conclusiones.....	69
Referencias	70



Logística portuaria y el camino a los puertos 4.0	75
Resumen.....	75
Introducción.....	75
La cuarta revolución industrial.....	76
Puertos 4.0.....	79
Conclusiones.....	82
Referencias	83
 CAPÍTULO II. PONENCIAS NACIONALES.....	85
 Aeropuerto verde. Concepción y estrategias de gestión	86
Resumen.....	86
Introducción.....	86
Desarrollo conceptual de aeropuerto verde. Metodología	87
Conclusiones.....	90
Referencias	91
 CAPÍTULO III. Track de investigación maestría.....	93
 Desarrollo de un método de medición de deformaciones estructurales en aeronaves UH-60 y trámite para la obtención de la propiedad intelectual	93
Resumen.....	94
Introducción.....	94
Marco teórico	95
Metodología	106
Resultados esperados.....	108
Conclusiones.....	110
Referencias	110
 Primeros estudios para la implementación de un generador eólico para una base temporal de Colombia en la Antártida.....	112
Resumen.....	112
Introducción.....	112
Descripción del problema.....	113
Formulación del problema.....	114
Objetivos	114
Marco teórico	115
Metodología	116
Instrumentos de recolección de datos	117
Análisis de resultados.....	117
Conclusiones y recomendaciones	118
Referencias	120
 CAPÍTULO IV. Track de investigación Ingeniería Industrial	122
 Generación de estrategias orientadas al uso del servicio al cliente como ventaja competitiva	123



Resumen.....	123
Introducción.....	123
Referente teórico.....	124
Métodos y materiales.....	127
Análisis de resultados parciales.....	127
Conclusiones parciales.....	132
Referencias.....	133

Diseño de un aplicativo de ruteo con ventanas de tiempo VRPTW enfocado al sector retail colombiano aplicando colonia de hormigas ACO y georreferenciación.....135

Resumen.....	135
Introducción.....	135
Marco teórico.....	137
Métodos y materiales.....	138
Conclusiones.....	154
Investigaciones futuras.....	155
Referencias.....	156

Análisis de tendencia al consumidor en la compra de ropa masculina159

Resumen.....	159
Objetivo general.....	160

Objetivos específicos.....160

Metodología.....	160
Marco teórico.....	160

¿Qué es la mezcla de mercadotecnia?164

Demanda elástica168

Desarrollo.....	169
Conclusiones.....	175
Referencias.....	176

Diseño de una herramienta de programación dinámica para la toma de decisiones en escenarios recursivos178

Luisa Fernanda Vargas Orjuela178

Resumen.....	178
Introducción.....	179
Metodología.....	179
Resultados y discusión.....	180
Funcionamiento VBA.....	181
Resultados.....	192
Conclusiones.....	192
Referencias.....	193

Diseño de un modelo de secuenciación enfocado en árboles de producto multinivel para sistemas de producción Just in Time - JIT194



Resumen.....	194
Introducción.....	194
Descripción del problema.....	195
Modelo matemático Heurística Miltenburg	197
Ampliación de la heurística y extensión de la condición multinivel con variables de tipo <i>inbound</i>	201
Programación de la Heurística Ampliada.....	204
Extensión de la condición multinivel con variables de tipo <i>outbounds</i>	208
Resultados de la ampliación de la heurística con extensión en la condición multinivel tanto en condiciones de <i>inbound</i> y <i>outbound</i>	210
Conclusiones.....	210
Referencias	211

Diseño de un aplicativo para sistemas de secuenciación en ambientes de producción flexible y Just in Time -JIT.....213

Resumen.....	213
Introducción.....	213
Descripción del problema.....	214
Alcance	214
Modelos de las heurísticas de los sistemas de producción flexible y el sistema <i>Just In Time</i>	215
Resultados programación de los sistemas de secuenciación flexibles y JIT.....	218
Conclusiones.....	228
Referencias	229

Una comparación y análisis de la predicción de las series de tiempo a partir de la optimización de la función de activación y de los pesos del vector de entrada de una red neuronal.....230

Resumen.....	230
Introducción.....	230
Marco teórico	232
Aplicación de modelos	235
Análisis de ajustes de los conjuntos de modelos	237
Pronóstico.....	238
Resultados	241
Conclusiones.....	243
Referencias	243



VIII Congreso Universidad Militar Nueva Granada

**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA APLICADA**



III Congreso Escuela de Postgrados FAC

**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA AERONÁUTICA**



**ESCUELA DE POSTGRADOS DE LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA
CAPITÁN JOSÉ EDMUNDO SANDOVAL
PROGRAMAS EN LOGÍSTICA AERONÁUTICA
III CONGRESO INTERNACIONAL DE LOGÍSTICA AERONÁUTICA**

Presentación

El desarrollo de las estrategias aplicadas a la logística aeronáutica, desde los conceptos de medio ambiente, servicio y mejora continua de sus operaciones, deben ligarse al desarrollo integral y transversal de la optimización de recursos, aeropuertos verdes, la confiabilidad en la gestión e información, la implementación de tecnologías 4.0, entre otros que han sido tratados en el Congreso Internacional de Logística.

El Congreso internacional de logística del año 2018 ha sido la confluencia de los eventos organizados por la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana, llamado “Congreso Internacional de Logística Aeronáutica”, y el “Congreso Internacional de logística aplicada” desarrollado por la Universidad Militar Nueva Granada. Los ponentes internacionales en conjunto con los nacionales han participado con temáticas transversales y complementarias para el desarrollo de los servicios aeronáuticos militares y de transporte civil, en este caso la participación de ponentes de diferentes nacionalidades como Argentina, Chile, Panamá, Cuba, España y Colombia, con perspectivas ambientales, tecnológicas y de gestión, han permitido consolidar un evento ideal y para los lectores será una experiencia enriquecedora al igual que para los nuevos participantes en la logística.

Para abordar el documento, finalmente, se le manifiesta al lector que mantener el prospectivo entorno a un parque empresarial aeronáutico, representa la confluencia de estudios que conlleven a la mejora continua articulada con el concepto de *confiabilidad en la gestión de aeropuertos verdes*.

Subteniente Jeimmy Nataly Buitrago Leiva
Director Maestría en Logística Aeronáutica (E)



VIII Congreso Universidad Militar Nueva Granada
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA APLICADA**



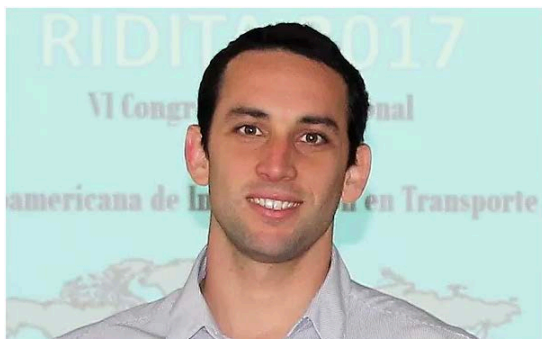
III Congreso Escuela de Postgrados FAC
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA AERONÁUTICA**



CAPÍTULO I. Ponencias Internacionales



Análisis de emisiones gaseosas y estudio comparativo de CO₂ en aeropuertos aerocomerciales argentinos



Matías J. Coppa¹,
Juan Ignacio D'Iorio¹
Nahuel Tomassini²,
Lucas Sznajderman^{1,3}
Alejandro Di Bernardi¹

Resumen

Un inventario de emisiones gaseosas (HC, CO, NO_x, y CO₂, entre otros contaminantes) proporciona valores totales de los gases liberados al medio ambiente y constituye la base para la notificación y la planificación de la mitigación de los impactos que pudieran llegar a tener lugar. Dado que la OACI reconoce que las fuentes de emisiones relacionadas con los aeropuertos tienen la capacidad de generar emisiones que pueden contribuir al deterioro de la calidad del aire en las comunidades circundantes, el presente estudio realiza una caracterización general de dichos gases y la posible interacción con el entorno inmediato.

Por otro lado, entendiendo que el transporte aéreo contribuye (mediante su cuota parte) al cambio climático, el objetivo del presente estudio consiste en cuantificar y comparar el aporte contaminante de dióxido de carbono (CO₂) producido por las principales fuentes en los aeropuertos: edificio terminal y consumo eléctrico asociado, vehículos de acceso en tierra (GAV), operaciones de aeronaves civiles y comerciales, y vehículos de asistencia a la aeronave en plataforma (GSE). Mediante el desarrollo de distintos indicadores, se analizan las emisiones de CO₂ relativas a los pasajeros transportados y operaciones de aeronaves civiles y comerciales.

Se realiza entonces un inventario de las emisiones de CO₂ de las principales fuentes de los siguientes aeropuertos: Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery (SABE), Aeropuerto Internacional de Córdoba (SACO) y el Aeropuerto Internacional de Salta (SASA).

¹ Docente e investigador de la Universidad La Plata, integrante del grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Buenos Aires, Argentina. Participación en el desarrollo de un proyecto de carrera de Posgrado: “Especialización en Proyectos Aeroportuarios”, armado de la Estructura Curricular, contenidos, organización y documentación. Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 s/n e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Provincia. Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: matias.coppa@gmail.com y aledibernardi@hotmail.com

² ANAC (Administración Nacional de Aviación Civil)

³ CIC (Comisión de Investigaciones Científicas), Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.



El estudio efectuado se encuentra encolumnado con los objetivos del comité de protección ambiental aeronáutica (CAEP), particularmente con los del grupo de trabajo: WG2, WG3, ACCS, GMTF, entre otros.

Palabras clave: Aeropuertos, Multimodal, Emisiones, CO₂

Introducción

Las infraestructuras aeroportuarias, a la vez de ser centros fundamentales de actividad, impulsores de la economía, del desarrollo social y cultural, así como vertebradores e integradores de regiones y estados, son también elementos que interactúan con el medio ambiente sobre el que se asientan. La necesidad de hacer compatible el desarrollo del transporte aéreo con la conservación de los valores naturales y de la calidad de vida en el entorno aeroportuario precisa un modelo de actuación basado en el equilibrio entre los factores económicos, sociales y ambientales, que permita el acercamiento a un modelo sostenible de desarrollo.

La OACI reconoce la contaminación acústica como uno de los principales aspectos ambientales generados a causa de la actividad aérea y específicamente la aeroportuaria (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2013). De ahí que la reducción al mínimo de los niveles acústicos y la protección de la calidad de vida de las poblaciones del entorno aeroportuario se haya convertido en una de las prioridades para dicha organización. Respecto a las emisiones gaseosas contaminantes, el foco está puesto en la reducción en la fuente de generación, es decir, los motores que equipan a las aeronaves. Los mismos deben cumplir con los estándares establecidos en el *Anexo 16 - Protección del medio ambiente, Volumen II: emisiones de los motores de las aeronaves para su certificación* (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2008a) y el *Volumen III: emisión de CO₂ de los aviones* (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2017).

Uno de los objetivos de la OACI respecto al medio ambiente es el de limitar o reducir las repercusiones de las emisiones de la aviación en la calidad del aire local, los contaminantes de las aeronaves que causan preocupación en este aspecto, son las emisiones gaseosas que actualmente se controlan para la certificación de motores de aeronaves en el marco del anexo 16, volumen II, incluidos los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos sin quemar (HC). También se reconoce que las emisiones de contaminantes secundarios (VOC_s) y la materia en partículas (PM) de las aeronaves pueden tener efectos locales adversos (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2011).

La magnitud de la contaminación aérea y su impacto en la calidad del aire puede variar de un aeropuerto a otro, según el emplazamiento y la índole de las instalaciones y servicios de transporte público que presten servicio a este. La necesidad de reducir la contaminación aérea que producen los vehículos motorizados del aeropuerto, el tráfico de acceso y otros, ha atraído la atención de la mayoría de los gobiernos y de algunas organizaciones intergubernamentales.

Se considera que el aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar humanos. Sin embargo, su contaminación sigue representando una amenaza importante para la salud en todo



el mundo. Según una evaluación de la OMS de la carga de enfermedad debida a la contaminación del aire, son más de dos millones las muertes prematuras que se pueden atribuir cada año a los efectos de la contaminación del aire en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados (producida por la quema de combustibles sólidos) (World Health Organization, 2005). De acuerdo a distintos estudios, las emisiones gaseosas producto del transporte aéreo (año 2006), produjeron 9.970 muertes prematuras en todo el mundo, de las cuales el 20 % de ellas son atribuidas a la actividad aeroportuaria (Barrett, Britter y Waitz, 2010).

La cuantificación de los gases regulados por OACI en el anexo 16 constituye el paso previo para la determinación de las concentraciones atmosféricas previstas, siendo esta la base de los estudios de dispersión y consecuencias sobre la calidad del aire local (LAQ) utilizados para demostrar el cumplimiento de los reglamentos o normas requeridos. La masa total emitida no tiene en cuenta la mezcla en la atmósfera que determina las concentraciones locales, ni tampoco cuánta masa se mezcla en el aire en un tiempo determinado, de allí la necesidad de realizar un estudio de dispersión gaseosa y mediciones *in situ* para cuantificar la población afectada (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2007).

Marco teórico

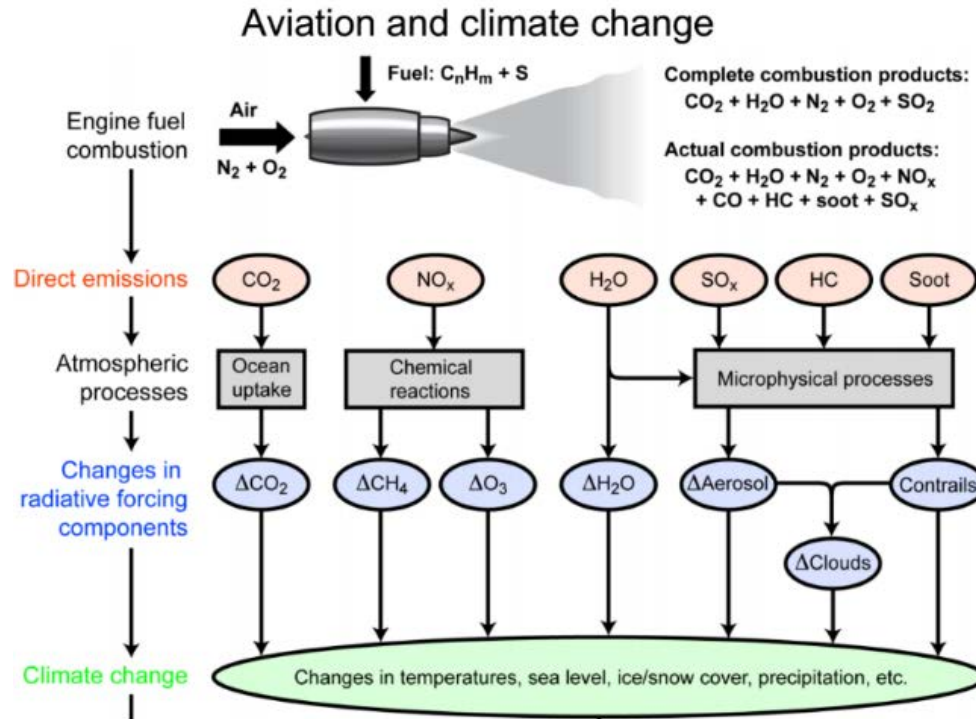
El volumen del tráfico aéreo mundial se ha ido duplicando una vez cada 15 años desde 1977, y se espera que este crecimiento continúe a pesar de ciclos de recesión cada vez mayores. Se pronostica que el tráfico regular de pasajeros, medido en términos de Revenue Passenger Kilometres (RPK), crezca de cinco mil millones a más de 13 mil millones en el periodo: 2010-2030, con un promedio anual de tasa de crecimiento de 4,9 % (Boeing, 2013). Respecto al tráfico internacional de pasajeros, se estima un aumento del 5,1 % anual, mientras que el tráfico doméstico crecería a un ritmo más lento del 4,4 % (periodo 2010-2030). Cabe mencionar, que en este último sector se espera un crecimiento con un promedio anual de 5,2 % de 2010 a 2030, incrementado de 200 billones de Revenue Passenger Kilometres (RTK) en 2010, a 562 billones en 2030 (Flightglobal Consultancy, 2015) .

La consecuencia directa de un crecimiento del tráfico aéreo es un mayor consumo de combustible y una mayor contaminación gaseosa que afecta la calidad del aire, de vida, la fauna y zonas protegidas en las áreas vecinas a un aeropuerto. Considerando además que la tendencia temporal de crecimiento urbano lleva a la ciudad hacia las inmediaciones del predio aeroportuario, la anticipada identificación de áreas sensibles permite una menor afectación tanto en el desarrollo urbano como aeroportuario bajo la premisa de competitividad territorial.

Específicamente, las emisiones de los motores de los aviones incluyen el dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos no quemados (HC), material particulado (PM), compuestos orgánicos volátiles (VOC) y otros compuestos (Lefebvre, 1983). Aproximadamente un 70 % de dichas emisiones son CO₂ y un 30 % de H₂O, donde el resto de los compuestos representan menos del 1 %. La siguiente figura proporciona una simple ilustración de los efectos del quemado de un combustible aeronáutico convencional (Wuebbles, Gupta y Ko, 2007).



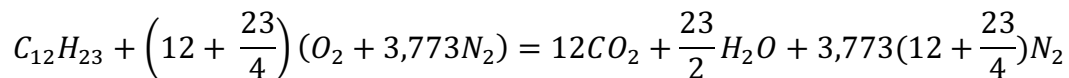
Figura 1. Esquema de las emisiones y el impacto ambiental producto de la actividad aérea



Fuente: Wuebbles et al. (2007).

La ecuación que representa una combustión completa de un hidrocarburo de composición molecular promedio $C_{12}H_{23}$ como el caso del combustible aeronáutico Jet A1, es (Heywood, 1998):

Ecuación 1. Combustión estequiométrica del combustible aeronáutico convencional Jet A1



Las cantidades totales de gases emanados dependerán de ciertos factores tales como el tipo de combustible utilizado, la riqueza de la mezcla, el mantenimiento de la cámara de combustión o del motor en general, las condiciones atmosféricas de operación, la etapa de vuelo analizada, entre otros.

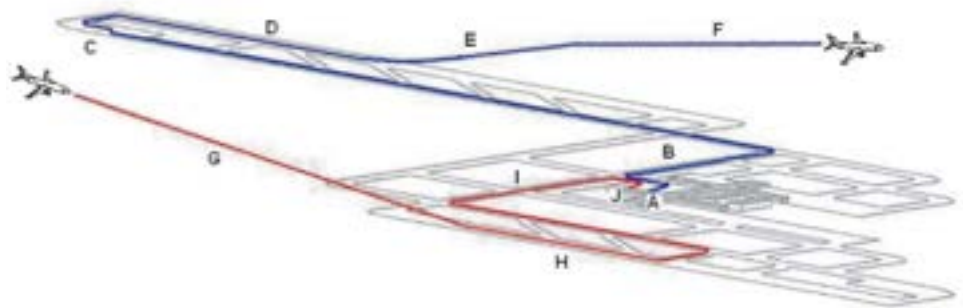
Las normas OACI sobre emisiones de los motores, se aplican mediante procesos de certificación nacionales y multinacionales de los motores de turborreactión y turbofan con empuje superior a 26,7 kilonewtons (kN), no así a los motores turbohélice, alternativos y grupos auxiliares de



energía (APU) (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2008a). Dicha normativa se basan en la performance de los motores en el ciclo de aterrizaje y despegue (LTO) idealizado como se muestra a continuación (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2011).

Figura 2. Tiempos en el ciclo LTO

Fase de operación	Tiempo en el modo (minutos)	
Aproximación	4,0	
Rodaje y marcha lenta en tierra	26	7,0 (entrada) 19,0 (salida)
Despegue	0,7	
Ascenso	2,2	



Fuente: International Civil Aviation Organization - ICAO (2011).

Para la determinación del impacto ambiental en el entorno aeroportuario, se define dicho ciclo como aquel que comprende las siguientes fases (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2011):

- *Landing* - (aproximación): son todas aquellas operaciones que se realizan desde los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto hasta que alcanza la superficie de la pista.
- Taxi - (rodaje): son las maniobras que realiza el avión hasta llegar a su puesto de estacionamiento en plataforma en condición de *block-on* (calzos colocados) y las maniobras que realiza el avión desde el *block-off* (calzos afuera) hasta llegar a la cabecera de pista.
- *Take off* - (despegue): son las operaciones que realiza el avión en la pista para lograr el despegue.
- *Climb out* - (ascenso): son las operaciones que realiza el avión hasta alcanzar los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto.

Históricamente, la OACI ha elaborado normas de certificación para las emisiones de los motores de aeronaves basadas en un ciclo normalizado, con hipótesis implícitas para el tiempo que una aeronave operará en el ciclo LTO.

Los reglajes de empuje y el tiempo en cada etapa dependen, en gran medida, de condiciones específicas como peso de la aeronave, temperatura exterior, viento, altitud del aeropuerto, condiciones de las pistas y procedimientos de la línea aérea, en distintos estudios se ha



demostrado la notable diferencia en la concentración adoptando un ciclo con valores estándares y reales en un aeropuerto (Alejandro, Coppa y Tomassini, 2014; Coppa, D'Iorio, Di Bernardi y Tomassini, 2015; Di Bernardi, Coppa y D'Iorio, 2014; Masiol y Harrison, 2014). Más allá de dicha situación, a nivel global podemos afirmar que aproximadamente el 10 % de las emisiones gaseosas totales de la actividad aeronáutica se emiten en dicho ciclo, y el restante 90 % se emite a altitudes por encima de los 1.000 m (Simone, Stettler y Barrett, 2013).

De acuerdo con el documento 9889 *Airport Air Quality Manual* (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2011), los aeropuertos deben mantener un inventario de emisiones gaseosas con el objetivo de:

- Colectar información y monitorear las tendencias para evaluar escenarios futuros;
- Evaluar comparativamente de acuerdo a requerimientos legales;
- Crear datos de entrada para modelos de dispersión en un esfuerzo para determinar la concentración de contaminantes y;
- Establecer bases para programas de mitigación.

En los aeropuertos, además de registrarse las emisiones por la operación de las aeronaves, se determinan como principales fuentes de emisión las procedentes de los vehículos de transporte en accesos y estacionamientos del aeropuerto (GAV - Ground Access Vehicles), las de fuentes estacionarias (calderas y depósitos de combustible, edificio terminal), las que se generan en las prácticas contra incendios, y aquellas procedentes de vehículos de apoyo en tierra (GSE - Ground Support Equipment). Se presenta a continuación una imagen representativa de las principales fuentes de emisiones en un aeropuerto.

Figura 3. Principales fuentes de emisiones gaseosas contaminantes en un aeropuerto



Fuente: elaboración propia.

Si bien las emisiones producto de los movimientos de aeronaves representan el mayor porcentaje del total, en la actualidad, debido a la complejidad y profundidad del tema no se han publicado estudios específicos que caractericen, cuantifiquen y discreticen el porcentaje de los distintos gases contaminantes respecto a la totalidad de las posibles fuentes en un aeropuerto. A partir del



análisis de distintos estudios: Palocz-Andresen, 2009; Hannah, Hettmann, Rashid, Saleh y Yilmaz, 2012; Trujillo, Sznajderman, Coppola, D'Iorio & Di Bernardi, 2017, se observa la variación de los porcentajes relativos de las emisiones en cada una de las fuentes, y por ende la necesidad de realizar un inventario y análisis integral que contemple la totalidad de estas.

La contaminación gaseosa producto del uso de vehículos impulsados por motores de combustión interna es un tema de preocupación mundial en la actualidad. En las instalaciones aeroportuarias se produce una gran actividad diariamente, tanto por aquellas destinadas a dar asistencia a pasajeros, mercancías y aeronaves en tierra (vehículos *handling*) como aquellos vehículos de acceso al mismo.

El *handling* engloba entre sus operaciones el transporte de pasajeros desde las terminales a las aeronaves y viceversa, los procesos de carga y descarga de mercancías y equipajes, el suministro de energía y combustible a la aeronave, transporte de tripulaciones, así como todas las maniobras que deben realizarse para situar al avión en posición para efectuar el despegue o el inicio del rodaje según el caso. Los vehículos de asistencia incluyen todos los equipos de servicio en tierra y los vehículos asociados con los movimientos de la aeronave en la plataforma. Cada uno de estos vehículos poseen distintos tiempos de operación que, debido a su función, no todos los procesos pueden realizarse simultáneamente (Horstmeier y Haan, 2001).

El tipo de GSE varía según la aplicación en función de su operación. Por ejemplo, algunos son requeridos para brindar servicio a la aeronave luego del aterrizaje, otros para el despegue, otros para brindar servicio a los pasajeros y otros para las operaciones de carga y descarga.

Figura 4. Vehículos de apoyo a las aeronaves (GSE)



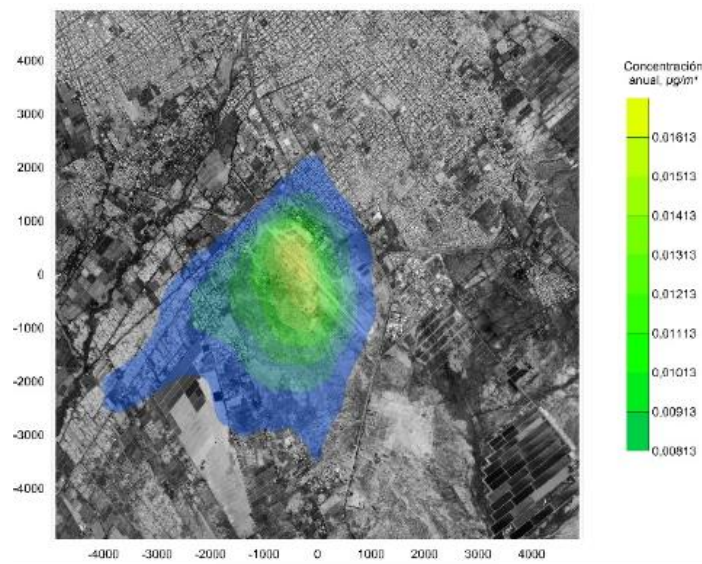
Fuente: Zurich Airport (2014).

Como fuentes estáticas en un aeropuerto podemos encontrar aquellos generadores, motores, cocinas, calderas y todo elemento que consuma, energía eléctrica, gas o combustible. Los valores de consumos de cada una de dichas fuentes energéticas suelen ser por lo general valores reservados entre los operadores aeroportuarios, y muchas veces sin una previa caracterización energética de todas las instalaciones e infraestructura aeroportuaria, se dificulta la incorporación en un inventario de emisiones. Pero el aporte de dichos sistemas poseen su cuota respectiva de emisiones que no pueden ser omitidas en un análisis de mayor profundidad (Kilkiş, 2014).



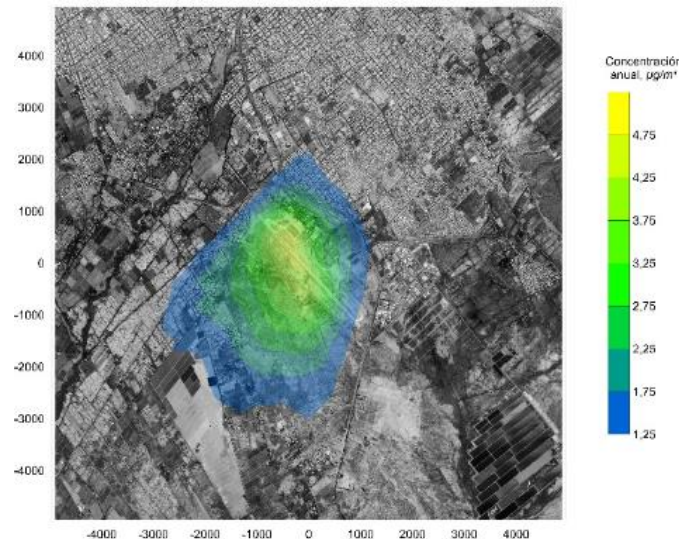
Por otro lado, una sustancia liberada de una fuente a la atmósfera libre será transportada por el campo medio del viento y dispersada por la turbulencia atmosférica. Este procedimiento se conoce como dispersión atmosférica. Esta puede definirse más estrictamente como una “diseminación de los valores en una distribución de frecuencias con respecto a un valor medio” (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2011). Se deduce entonces que la modelización de la dispersión atmosférica es la simulación matemática del proceso de diseminación o mezcla en la atmósfera ambiental. Las sustancias traza que se evalúan con mayor frecuencia son los contaminantes atmosféricos reglamentados para las fuentes aeroportuarias.

Figura 5. Curvas de isoconcentración PM_{10}



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Curvas de isoconcentración NO_x



Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Curvas de isoconcentración CO

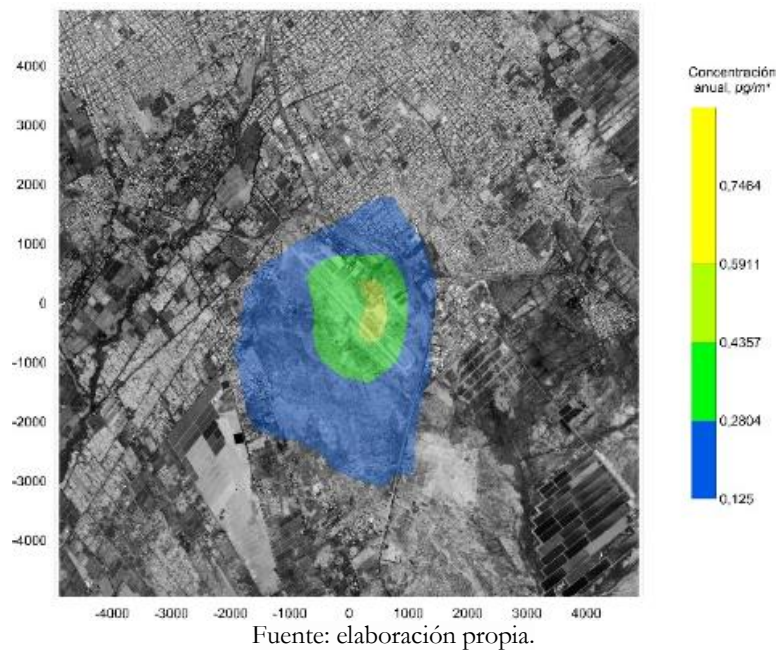
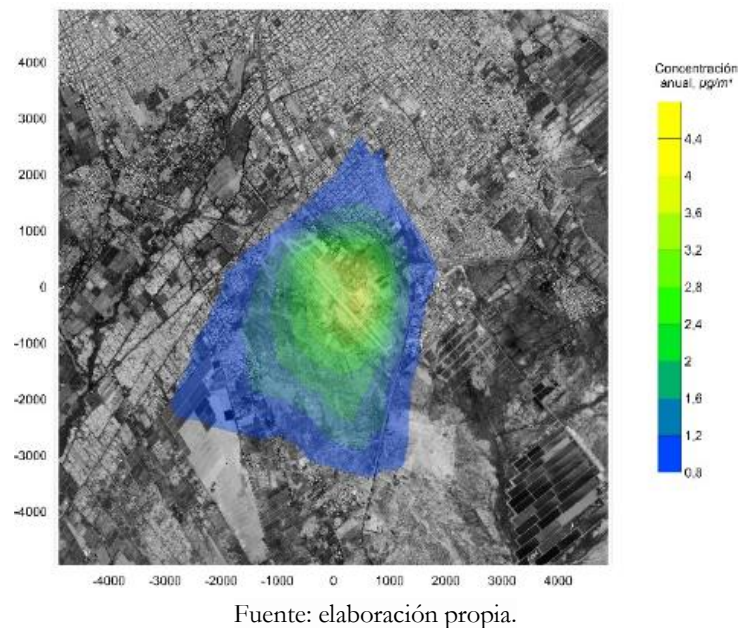


Figura 8. Curvas de isoconcentración HC



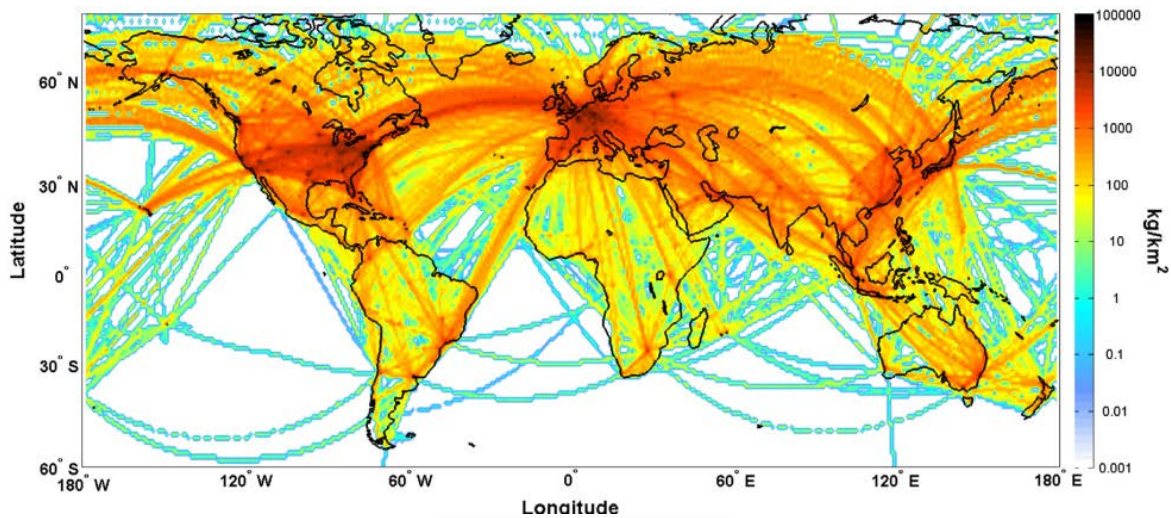
De acuerdo con el primer informe técnico de la IPCC destinado específicamente al sector del transporte aéreo, la cuota parte de las emisiones totales de CO₂ antropogénicas es del 2 %. Teniendo en cuenta la totalidad de los gases emitidos, su interacción con la atmósfera y su respectivo impacto en el cambio climático el valor alcanzado es de un 3,5 % en el forzamiento radiativo mundial antropogénico (Lee et al., 2009). De acuerdo con distintas proyecciones de



tráfico de la OACI se estima que las emisiones de CO₂ producto del transporte aéreo internacional aumentarán entre 111 % y 144 % entre 2005 y 2025 (es decir, de 416 Mt a entre 876 y 1013 Mt) (Macintosh y Wallace, 2009).

La cuantificación de emisiones de dióxido de carbono, tanto en niveles crucero como en las operaciones aeroportuarias, posee un método de cálculo demostrado y aceptado (Jardine, 2009) (International Civil Aviation Organization (ICAO), s.f.). Se han publicado distintos estudios, presentando inventarios específicos a nivel nacional (Fan, Sun, Zhu y Wen, 2012), como a nivel internacional con base a estimaciones de tráfico de OACI (Olsthoorn, 2001; Eyers *et al.*, 2004; Vedantham & Oppenheimer, 1998).

Figura 9. Distribución espacial de consumo de combustible aeronáutico



Fuente: Simone et al. (2013)

Por otro lado, estudios sobre el impacto ambiental debido a la actividad comercial de CO₂ en las distintas latitudes y longitudes muestran cómo el 92 % del combustible consumido se genera en el hemisferio norte, y el 67 % entre los paralelos 30 y 60 N. (Simone et al., 2013). A su vez, los patrones de viento típicos en las latitudes medias superiores tienden a concentrar estas emisiones sobre el Ártico y desplazar las emisiones de latitudes medias hacia la misma región, siendo esta una de las más afectadas debido al transporte aéreo (Wilkerson et al., 2010; Brasseur et al., 1998).

Los principales consumidores de energía en los aeropuertos se pueden dividir entre el lado aire y el lado tierra. Los consumidores de energía del lado aire son los sistemas de iluminación, sistema de balizamiento y los sistemas de navegación. Por el lado tierra se encuentra principalmente la terminal, debido a su función como un nodo para procesar pasajeros y carga y la necesidad de las instalaciones requeridas para su operación. La principal fuente energética en este caso es la energía eléctrica (Alba y Manana, 2016).



Metodología

A continuación, se detalla el proceso para el cálculo de las emisiones de CO₂ derivadas de las operaciones de las aeronaves, de los respectivos GSE, de los GAV y producto de energía eléctrica consumida para los aeropuertos: Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery (SABE), Aeropuerto Internacional de Córdoba (SACO) y el Aeropuerto Internacional de Salta (SASA).

- Caracterización de los aeropuertos: mezcla de tráfico, planta poder, distribución de perfiles, diarios, mensuales y anuales de operaciones.
- Análisis de herramientas de cálculo a utilizar: determinación de cada método a aplicar en cada fuente según información disponible.
- Determinación de flota operativa, planta poder y tiempos en el ciclo LTO.
- Determinación de perfiles de servicio típico según aeronave. Análisis de todos los vehículos *handling* soporte de cada avión (tiempos de servicio, potencia de motores, factores de carga, entre otros factores considerados).
- Cuantificación de las emisiones de CO₂ de cada fuente analizada para todos los aeropuertos bajo estudio. Obtención de resultados comparativos y relativos a parámetros de operaciones y pasajeros transportados.

Figura 10. Proceso lógico de trabajo para determinar la contaminación gaseosa



Fuente: elaboración propia.

Aeropuertos analizados

Se presentan a continuación los tres aeropuertos analizados: Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery (SABE), Aeropuerto Internacional de Córdoba (SACO), y el Aeropuerto Internacional de Salta (SASA).



Figura 11. Vista aérea del Aeroparque Jorge Newbery



Fuente: Google Earth

Figura 12. Vista aérea del Aeropuerto Internacional de Córdoba



Fuente: Google Earth



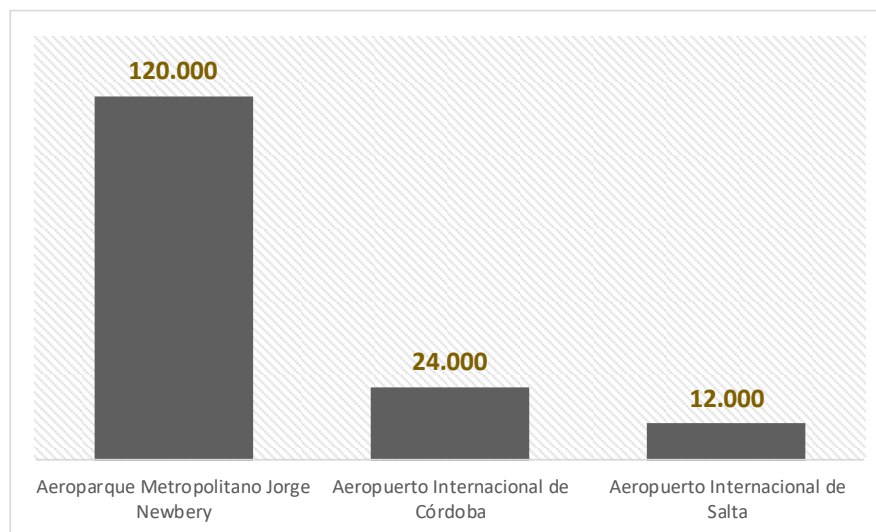
Figura 13. Vista aérea del Aeropuerto Internacional de Salta.

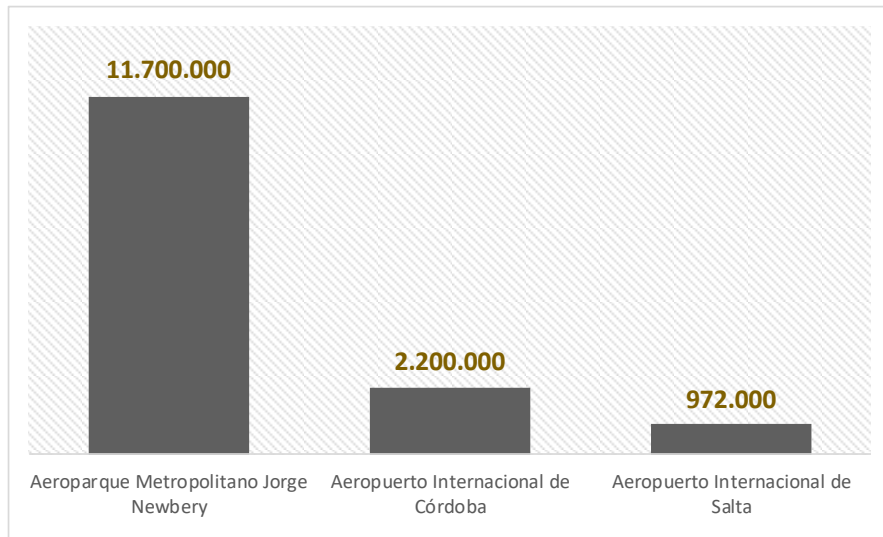


Fuente: Google Earth

Como se aprecia en la siguiente figura, los tres aeropuertos poseen una notable diferencia en la cantidad de operaciones civiles, comerciales y de pasajeros transportados.

Figura 14. Superior Operaciones/año. Inferior Pasajeros Transportados (ORSNA, 2017)





En la siguiente tabla se presentan los porcentajes de pasajeros transportados según su clasificación.

Tabla 1. Distribución de pasajeros en los aeropuertos bajo estudio

	Domésticos	Internacionales	Tránsito
Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery	75 %	19 %	6 %
Aeropuerto Internacional de Córdoba	66 %	30 %	4 %
Aeropuerto Internacional de Salta	92 %	5 %	3 %

Fuente: ORSNA (2017)

Emisiones de CO₂ producto de la operación de aeronaves

Las emisiones de dióxido de carbono producto de las operaciones de aterrizaje y despegue dependen principalmente del *Time in Mode* - TIM (segundos), los índices de emisión del motor principal – EI, por sus siglas en inglés *Emission index* (kg de CO₂/kg de combustible) y flujo de combustible del motor principal - FF (kg), por sus siglas en inglés Fuel Flow.

- **Time in Mode (TIM):** es el periodo de tiempo real donde los motores de las aeronaves operan a un reglaje de potencia identificado, normalmente correspondiente a uno de los modos de operación del LTO del ciclo de vuelo operacional.
- **Índice de emisión (EI) y flujo de combustible:** el índice de emisión se define como la masa de contaminante emitida por unidad de masa de combustible consumido para un determinado motor. El banco de datos sobre emisiones de motores (EEDB) (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2015) de OACI proporciona el EI para más de 500 motores certificados, así como el flujo de combustible específico del modo en unidades de kilogramo por segundo (kg/s), para los cuatro reglajes de potencia



del plan de certificación de emisiones de motores. Para el caso específico del CO₂ el EI es 3,157 (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2008b).

La siguiente fórmula representa la base para el cálculo de las emisiones de CO₂ para una única combinación de aeronave y motor (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2011):

Ecuación 2. Método de cálculo

$$Ei_j = \sum (TIM_{jk} * 60) * (FF_{jk}) * (Ei_{ijk}) * (Ne_j)$$

Donde:

- Ei_j = emisiones totales de contaminantes i (CO₂ en este caso), en gramos, producidas por el tipo de aeronave j para un ciclo LTO;
- Ei_{ijk} = índice de emisión para el contaminante i (CO₂ en este caso), en gramos por contaminante por kilogramo de combustible (g/kg de combustible), en el modo k (p. ej. despegue, ascenso, marcha lenta y aproximación) para cada motor empleado en el tipo de aeronave j;
- FF_{jk} = flujo de combustible para el modo k (p. ej., despegue, ascenso, marcha lenta y aproximación), en kilogramos por segundo (kg/s), para cada motor empleado en el tipo de aeronave j;
- TIM_{jk} = tiempo en el modo para el modo k (p. ej. marcha lenta, aproximación, ascenso y despegue), en minutos, para el tipo de aeronave j;
- Ne_j = número de motores empleados en el tipo de aeronave j.

En el método de cálculo, los tiempos de cada una de las etapas del ciclo tiene asociado un valor en el consumo de combustible, y por consecuencia un impacto en la concentración de los gases contaminantes. Como se mencionó anteriormente, debido a la diferencia existente entre los tiempos del ciclo LTO de referencia y el real en un aeropuerto bajo estudio, en el presente informe, analizando las velocidades de carreteo, aproximación, distancias y tiempos de taxeo, se adaptaron las condiciones operativas de cada aeropuerto, con el fin de cuantificar con mayor precisión las emisiones.

Emisiones de CO₂ producto de los GAV (*Ground Access Vehicles*)

Para el análisis del aporte contaminante producido por la operación de los vehículos de acceso terrestre denominados en su conjunto como GAV (*Ground Access Vehicles*), es necesario establecer distintos parámetros que definirán los casos de estudio. El proceso de cálculo requiere de:

- Determinación de distancias de los segmentos de rutas de acceso.
- Determinación de porcentajes de circulación vehicular por mezcla de flota y por tipo de combustible.



- Determinación de la cantidad de kilómetros transitados de la mezcla de flota vehicular.
- Factores de emisión de cada contaminante en unidades de masa por kilómetro transitado.

Se discrimina la flota vehicular en 3 tipos: vehículo de pasajeros, vehículos de transporte livianos (taxis, remises, vans, entre otros) y vehículos de transporte pesados (buses, trenes, subterráneos, transfer, entre otros). Este a su vez se subdivide según tres tipos de combustible gasolina, diésel y gas natural comprimido (GNC).

La cantidad de kilómetros transitados por la mezcla vehicular (VKT: *Vehicles Kilometers Traveled*) es estimada a partir de datos del año 2017 de cada uno de los aeropuertos bajo análisis por el Organismo Regulador del Sistema Nacional de Aeropuertos (ORSNA, 2017), en el cual se presenta cantidad de pasajeros anual y porcentajes de modos de acceso. A continuación los cálculos a realizar de acuerdo a la metodología planteada:

Ecuación 3. Método de cálculo

$$E_{total} = (RL_1 \times NV_1 \times EF_1) + (RL_2 \times NV_2 \times EF_2) + \dots (RL_n \times NV_n \times EF_n) \quad (1)$$

Donde:

- E_{total} : total de emisiones de CO₂ en cada segmento de ruta de acceso.
- RL_n : longitud de ruta de acceso n .
- NV_n : cantidad de kilómetros transitados por mezcla de flota vehicular en la ruta de acceso n .
- EF_n : factor de emisión del CO₂ considerando tipo de flota vehicular en la ruta de acceso n .

Tabla 2. Distribución de modos de acceso a los aeropuertos bajo estudio

	Taxi	Automóvil particular	Transfer	Transporte público (bus)
Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery	61 %	23 %	10 %	6 %
Aeropuerto Internacional de Córdoba	42 %	54 %	2%	2 %
Aeropuerto Internacional de Salta	50 %	43 %	4 %	3 %

Fuente: ORSNA (2017)

Emisiones de CO₂ producto de los GSE

Existen diversos métodos para calcular las emisiones de gaseosas de los GSE (International Civil Aviation Organization - ICAO, 2011) (Kenney *et al.*, 2014). La metodología aplicada es la desarrollada por el Aeropuerto de Zurich (Zurich Airport, 2014), donde, dependiendo del tipo



de fuselaje de las aeronaves y la cantidad de ciclos LTO, es posible estimar las emisiones de CO₂. El método de cálculo aplicado es el siguiente:

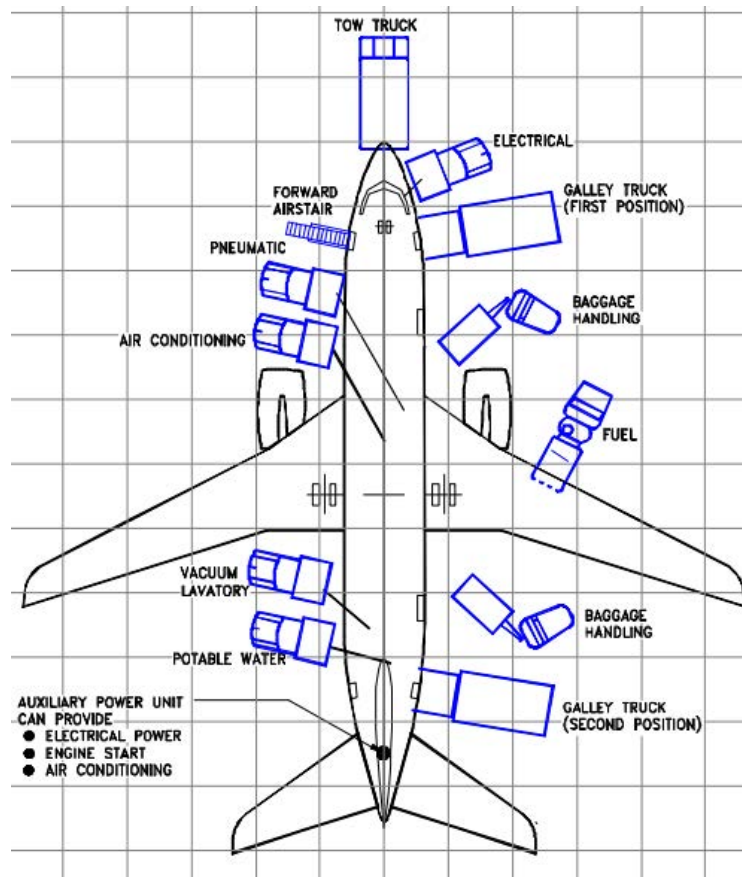
Ecuación 4. Método de cálculo

$$Emisiones (kg) = M * fe$$

Donde:

- *fe*: factor de emisión según tipo de fuselaje (kg de CO₂/ciclo).
- *M*: cantidad de movimientos de las aeronaves.

Figura 15. Posicionamiento típico de los vehículos GSE de un Boeing 737



Fuente. Boeing (2005).

Donde los factores de emisión adoptados fueron los que se presentan en la siguiente tabla:



Tabla 4. Factores de emisión por defecto representativos del aeropuerto de Zurich para servicios a las aeronaves

	CO₂ (Kg/ciclo)
Aeronave de fuselaje angosto	18
Aeronave de fuselaje ancho	58

Fuente: Zurich Airport (2014)

Emisiones de CO₂ producto del consumo eléctrico

Siguiendo tanto los lineamientos de la IPCC ((Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2006), como los utilizados por distintas organizaciones validadas a nivel internacional como ACI (Airport Council International) en el programa ACA (Airport Carbon Accreditation), se aplicó lo desarrollado en la normativa internacional (International Organization for Standardization, 2006) para el cálculo de las emisiones producto del consumo eléctrico en cada aeropuerto bajo análisis. El método de cálculo aplicado consiste básicamente en:

$$Emisiones (kg) = ef * cc$$

Donde:

- *ef*: factor de emisión del CO₂ (*kg de CO₂/kWh*).
- *cc*: consumo eléctrico anual (kWh).

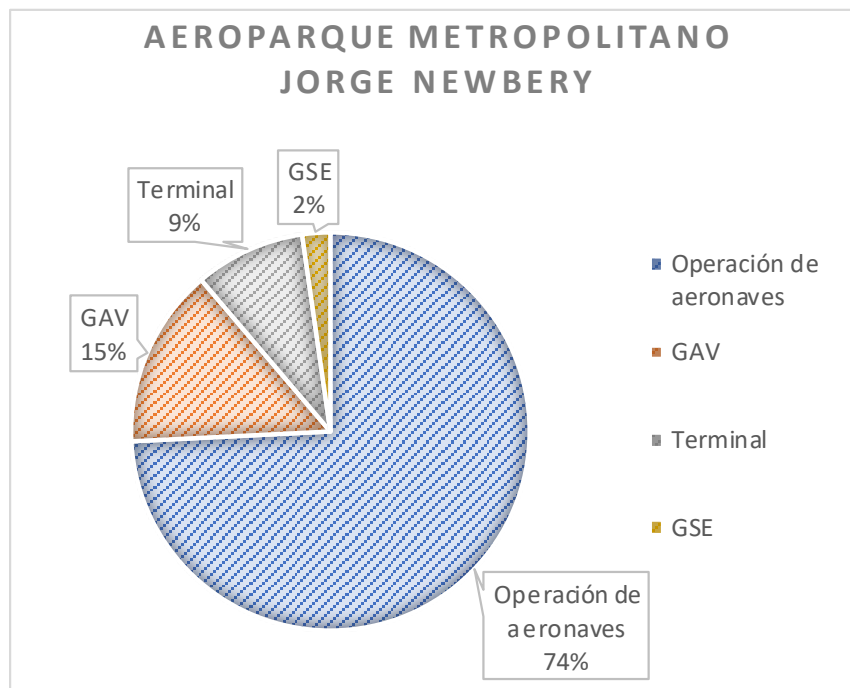
Al igual que ACI, se adoptó un factor de emisión aceptado y validado en distintos estudios (Brander *et al.*, 2011), el cual surge de la matriz energética propia de cada país. El valor adoptado para Argentina es de 0.391932833 (kgCO₂/kWh).

Resultados

De acuerdo con cada método de cálculo presentado y teniendo en cuentas las hipótesis adoptadas, se presentan a continuación los resultados obtenidos:

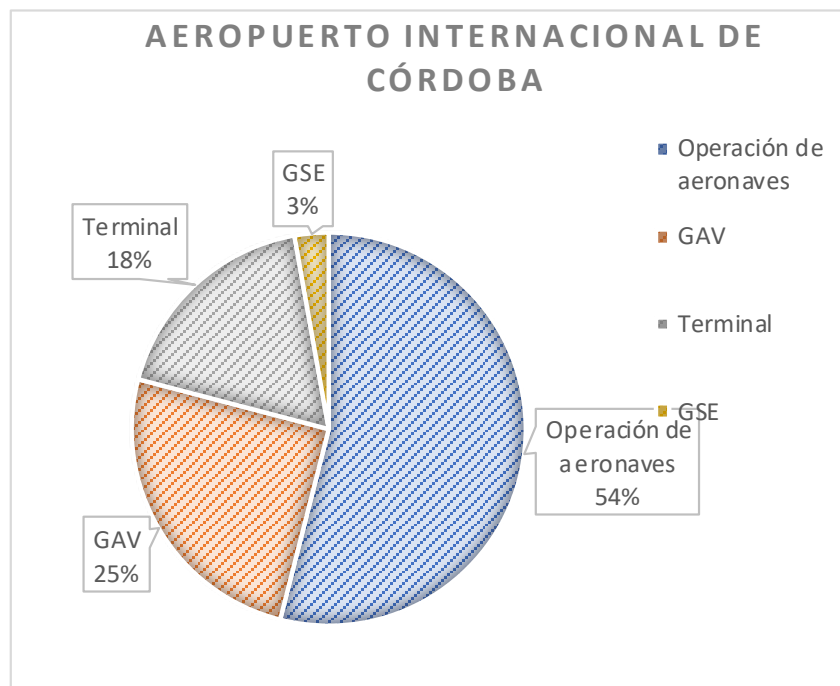


Figura 16. Distribución de emisiones de CO₂ en el Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery



Fuente: elaboración propia en base a los resultados obtenidos.

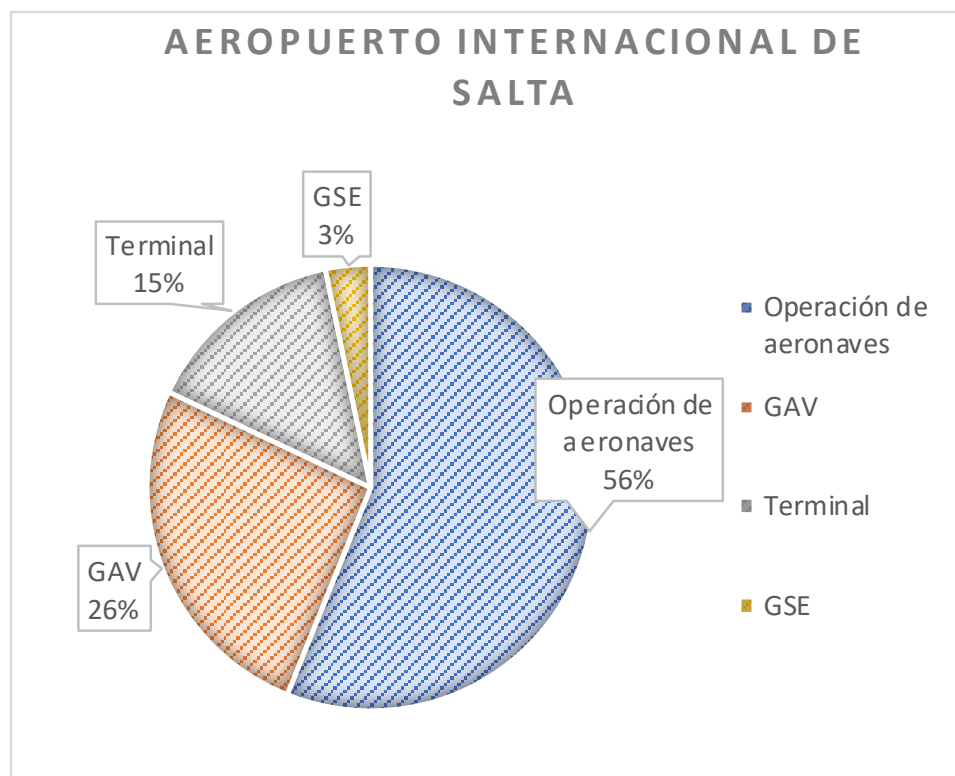
Figura 17. Distribución de emisiones de CO₂ en el Aeropuerto Internacional de Córdoba



Fuente: elaboración propia en base a los resultados obtenidos.



Figura 18. Distribución de emisiones de CO₂ en el Aeropuerto Internacional de Salta

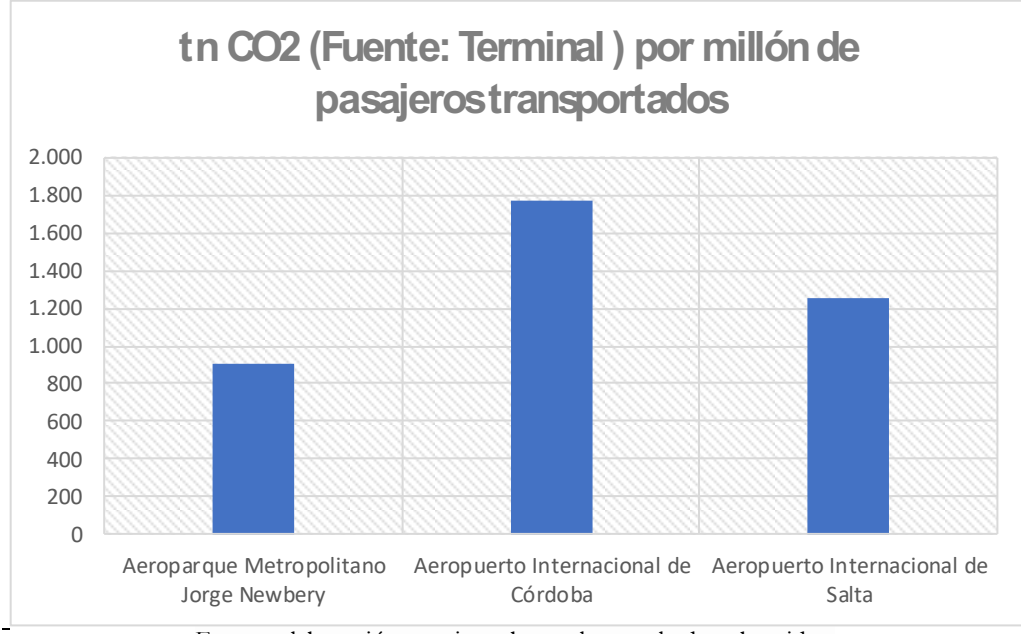


Fuente: elaboración propia en base a los resultados obtenidos.

Para obtener índices correspondientes a la actividad propia aeroportuaria, se presentan dos resultados: las emisiones de CO₂, analizando como fuente la terminal y los GAV relativo a los pasajeros transportados, y las emisiones de CO₂ analizando como fuente las operaciones en el ciclo LTO y GSE asociados relativo a la cantidad de operaciones civiles y comerciales.

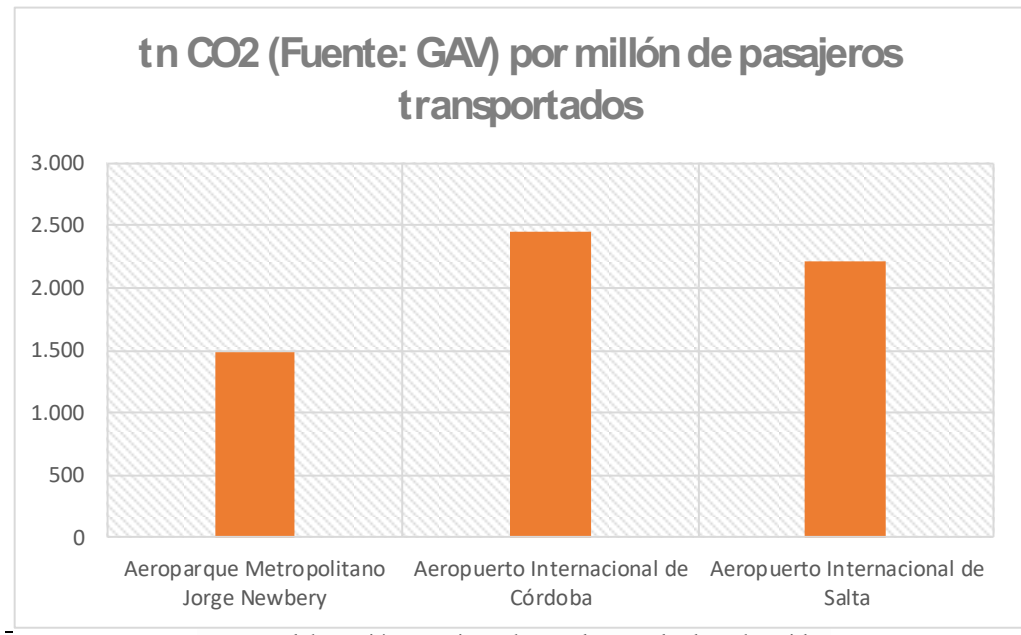


Figura 19. Toneladas emitidas CO₂ en los aeropuertos bajo estudio, analizando como fuente la terminal



Fuente: elaboración propia en base a los resultados obtenidos.

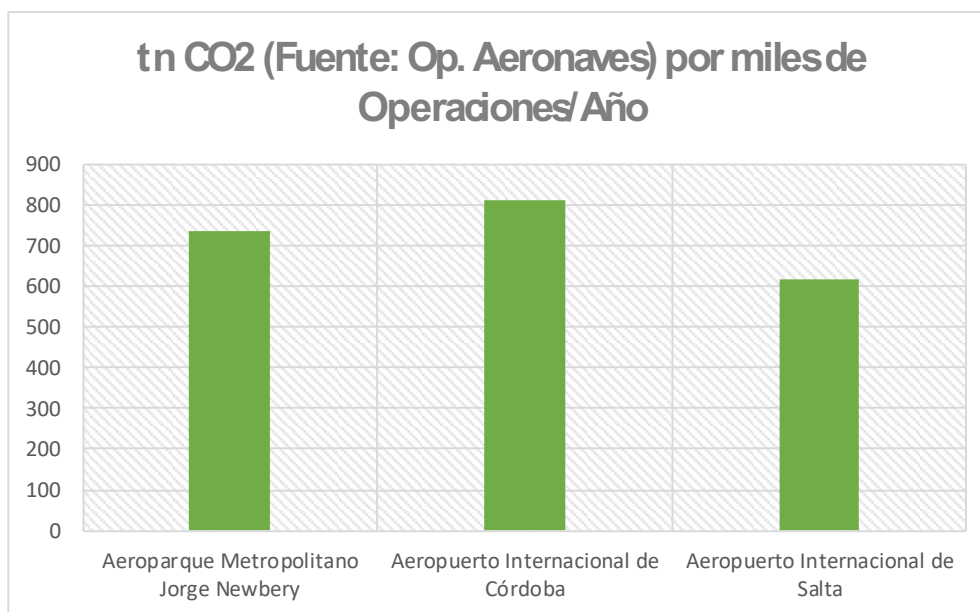
Figura 20. Toneladas emitidas CO₂ en los aeropuertos bajo estudio, analizando como fuente GAV



Fuente: elaboración propia en base a los resultados obtenidos

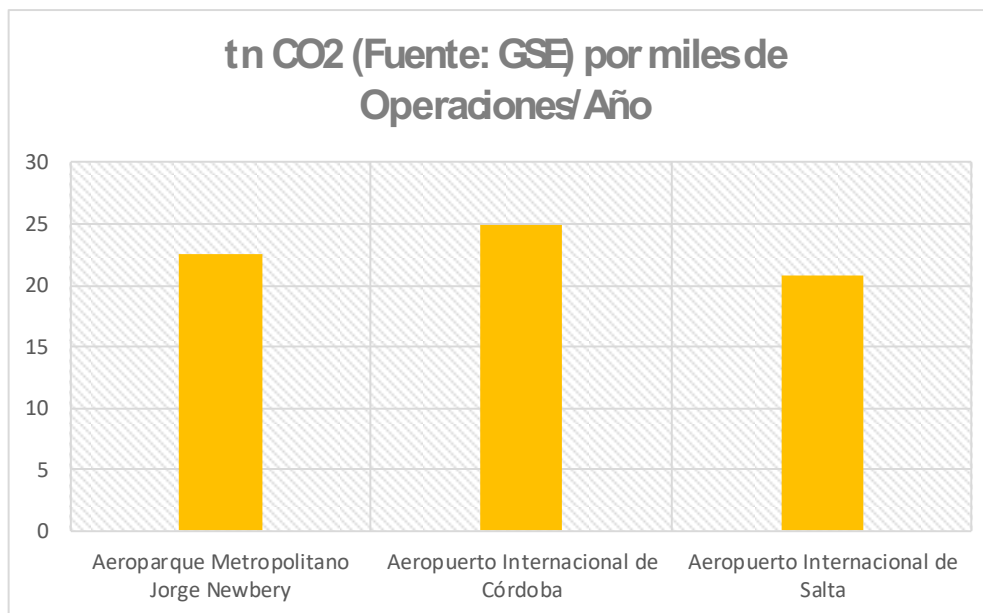


Figura 21. Toneladas emitidas CO₂ en los aeropuertos bajo estudio, analizando como fuente operación de aeronaves



Fuente: elaboración propia en base a los resultados obtenidos

Figura 22. Toneladas emitidas CO₂ en los aeropuertos bajo estudio, analizando como fuente GSE



Fuente: elaboración propia en base a los resultados obtenidos



Conclusiones

Para completar el inventario de emisiones gaseosas producto de la actividad aeroportuaria, es necesario el análisis de aporte contaminante de otras fuentes presentes en el aeropuerto, ya sean: estacionarias, móviles, discretas o continuas, según tipo y características de operación (según modelos de gestión) en el contexto de las configuraciones de las infraestructuras e instalaciones de la parte aeronáutica, en la parte pública y en los elementos de apoyo al aeródromo. En el presente informe no se han analizado las fuentes de emisiones que consumen energías alternativas como puede ser: gas natural, biomasa, entre otros. Si bien a priori es posible inferir que las emisiones tendrán un valor relativamente bajo con las aquí estudiadas, para el desarrollo de un inventario completo es estrictamente necesario la inclusión de estas.

Si bien el transporte terrestre de pasajeros no es directamente controlado por el operador aeroportuario, de acuerdo con la OACI, es necesario contar con un inventario completo de emisiones gaseosas y el aporte de los GAV deben estar incluidos. Un aeropuerto en sí es un intercambiador modal de transporte y por lo tanto debe contemplar la totalidad de transportes que este incluye. De acuerdo con las hipótesis y metodologías propuestas, se observa cómo la preponderancia de modos de acceso vehiculares del tipo taxi, autos particulares y autos alquilados, influye de forma directa en una mayor concentración de emisiones. En aeropuertos donde el porcentaje de modos de acceso de vehículos de mayor porte (transfer, buses, entre otros) las emisiones atribuidas a los GAV disminuyen notablemente.

El valor representado por las emisiones de los vehículos de asistencia es coherente con los estudios realizados previamente, sin embargo, podrían ser más precisos si se contara con un inventario de la flota para cada aeropuerto, el consumo de combustible total por los GSE, el número de horas de funcionamiento para cada tipo de servicio y de uso histórico, el tiempo de funcionamiento de cada unidad, entre otros. De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa una clara diferencia en aquellos aeropuertos donde la cantidad de operaciones de aeronaves de fuselaje ancho es mayor, esto se debe específicamente a que dichas aeronaves necesitan una mayor cantidad de vehículos y mayor tiempo asociado de los servicios.

La planificación y gestión del uso del suelo es un medio eficaz para garantizar que las actividades del aeropuerto y el entorno inmediato sean compatibles. El crecimiento de la actividad aeronáutica, asociado a la tendencia mundial del incremento de la densidad de población en grandes ciudades, se verá reflejado en la aparición de nuevas situaciones complejas de competitividad territorial.

El desarrollo de la actividad humana y el crecimiento de las urbanizaciones hacia los aeropuertos no es un tema menor, debe ser difundido para su conocimiento y consideración en los desarrollos de planes estratégicos, códigos urbanos, planes maestros, entre otros. La falta de planificación lleva a una restricción operacional en el aeropuerto con considerables pérdidas económicas, y una afectación ambiental directa a la población que reside en el entorno aeroportuario.



Para analizar de forma integral la relación existente entre el aeropuerto y su entorno, es necesario caracterizar la población afectada por las emisiones gaseosas y acústicas producidas por las plantas de poder de las aeronaves que operan en el aeropuerto, estudiar la relación con las servidumbres aeronáuticas, específicamente las superficies limitadoras de obstáculos (SLO); y la posibilidad de accidentes en el entorno inmediato.

Referencias

- Alba, S. O., & Manana, M. (2016). Energy research in airports: A review. *Energies*, 9(5), 1-19. Retrieved from <http://doi.org/10.3390/en9050349>
- Alejandro, D. B., Coppa, M., & Tomassini, N. (2014). Análisis comparativo de operaciones en el ciclo LTO en distintos aeropuertos en la región SAM. *SITRAER 2014 – Air Transportation Symposium*, Brazilian Air Transportation Research Society (SBTA), 16.
- Barrett, S. R. H., Britter, R. E., & Waitz, I. A. (2010). Global mortality attributable to aircraft cruise emissions. *Environmental Science and Technology*, 44(19), 7736-7742. Retrieved from <http://doi.org/10.1021/es101325r>
- Boeing. (2005). *Airport Planning - Boeing 737*.
- Boeing. (2013). *Current Market Outlook 2013-2032*.
- Brander, A. M., Sood, A., Wylie, C., Haughton, A., Lovell, J., Reviewers, I., & Davis, G. (2011, august). Electricity-specific emission factors for grid electricity. *Ecometrica*, 1-22. Retrieved from <http://doi.org/10.13044/j.sdewes.2014.02.0030>
- Brasseur, G. P., Cox, R. A., Hauglustaine, D., Isaksen, I., Lelieveld, J., Lister, D. H., & Wiesen, P. (1998). European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions. *Atmospheric Environment*, 32(13), 2329-2418. Retrieved from [http://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00486-X](http://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00486-X)
- Coppa, M., D'Iorio, J. I., Di Bernardi, A., & Tomassini, N. (2015). Análisis operacional y el impacto gaseoso del ciclo LTO en distintos aeropuertos europeos. *V Congreso de la Red Iberoamericana de Investigación en Transporte Aéreo*, 15.
- Di Bernardi, A., Coppa, M., & D'Iorio, J. I. (2014). Contaminación acústica y gaseosa en el Aeropuerto Internacional de Guarulhos y su impacto en la planificación de usos del suelo. *SITRAER – Air Transportation Symposium*. São Paulo, Brazil.
- Eyers, C. J., Norman, P., Middel, J., Plohr, M., Michot, S., & Atkinson, K. (2004). AERO2k Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025 Administration page. *Aviation*.
- Fan, W., Sun, Y., Zhu, T., & Wen, Y. (2012). Emissions of HC, CO, NO_x, CO₂, and SO₂ from civil aviation in China in 2010. *Atmospheric Environment*, 56(10), 52-57. Retrieved from <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.052>
- Flightglobal Consultancy. (2015). *Flightglobal Fleet Forecast 2015-2031*.
- Hannah, J., Hettmann, D., Rashid, N., Saleh, C., & Yilmaz, C. (2012). Design of a carbon neutral airport. *2012 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium, SIEDS 2012*, 40-45. Retrieved from <http://doi.org/10.1109/SIEDS.2012.6215125>
- Heywood, J. B. (1998). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.
- Horstmeier, T., & Haan, F. D. (2001). Influence of ground handling on turn round time of new large aircraft. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 73(3), 266-271. Retrieved from <http://doi.org/10.1108/00022660110390677>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *IPCC 2006 Guidelines for National*



Greenhouse Gas.

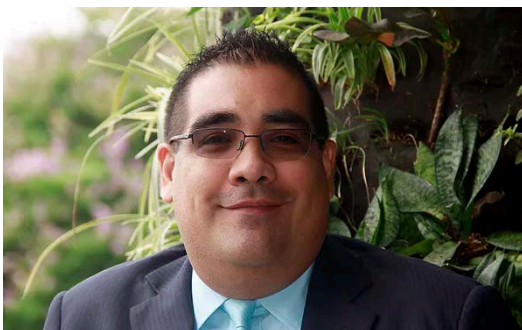
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (s.f.). Carbon Emissions Calculator. Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2007). *Doc. 9884 Orientación sobre derechos por emisiones de las aeronaves relacionados con la calidad del aire local.*
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2008a). *Annex 16 Environmental Protection - Volume II: Aircraft Engine Emissions* (Vol. II). Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2008b). *Carbon Emissions Calculator.* Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2011). *Doc 9889: Airport air quality manual, 1.* Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2013). *2013 Environmental Report: Destination Green.* Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2015). *ICAO Aircraft Engine Emissions Databank.* Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2017). *Annex 16 - Vol III - Aeroplane CO2 Emissions.*
- International Organization for Standardization. (2006). ISO 14064-1 Greenhouse gases - Specification with guidance at the organizational level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals, 32. Retrieved from <http://doi.org/10.5194/acpd-14-11895-2014>
- Jardine, C. (2009, february). Calculating the carbon dioxide emissions of flights. *Final Report by the Environmental Change.* Retrieved from http://airport-attorneys.com/files/jardine09_carboninflights.pdf
- Kenney, K. B., Fowler, C., Ratte, M., Sanford, P., Pringle, P., Sequeira, F. A., & Didyk, N. (2014). *Aviation Emissions and Air Quality Handbook Version 3.*
- Kilkiş, B. (2014). Energy consumption and CO2 emission responsibilities of terminal buildings: A case study for the future Istanbul International Airport. *Energy and Buildings*, 76, 109-118. Retrieved from <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.049>
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., & Sausen, R. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43, 3520-3537. Retrieved from <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>
- Lefebvre, A. H. (1983). Fuel Effects on Gas Turbine Combustion. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 5(4). Retrieved from [http://doi.org/10.1016/0142-727X\(84\)90057-2](http://doi.org/10.1016/0142-727X(84)90057-2)
- Macintosh, A., & Wallace, L. (2009). International aviation emissions to 2025: Can emissions be stabilised without restricting demand? *Energy Policy*, 37, 264-273. Retrieved from <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.029>
- Masiol, M., & Harrison, R. M. (2014). Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment*, 95, 409-455. Retrieved from <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.070>
- Olsthoorn, X. (2001). Carbon dioxide emissions from international aviation : 1950-2050, 7, 0-6.
- ORSNA, O. regulador del S. N. de A. (2017). *Datos claves.*
- Palocz-Andresen, M. (2009). Emissions at airports and their impact at the habitat. *Periodica*



- Polytechnica, Mechanical Engineering*, 53(1), 13-17. Retrieved from <http://doi.org/10.3311/pp.me.2009-1.02>
- Simone, N. W., Stettler, M. E., & Barrett, S. R. (2013). Rapid estimation of global civil aviation emissions with uncertainty quantification. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25, 33-41. Retrieved from <http://doi.org/10.1016/j.trd.2013.07.001>
- Trujillo, C., Sznajderman, L., Coppa, M., D'Iorio, J. I., & Alejandro, D. B. (2017). Análisis del aporte contaminante gaseoso de los GAV en el aeropuerto de Ezeiza. *VI Congreso de la Red Iberoamericana de Investigación en Transporte Aéreo (RIDITA)*, 12.
- Vedantham, A., & Oppenheimer, M. (1998). Long-term scenarios for aviation: demand and emissions of CO₂ and NO_x. *Energy Policy*, 26(8), 625-641. Retrieved from [http://doi.org/10.1016/S0301-4215\(98\)00021-4](http://doi.org/10.1016/S0301-4215(98)00021-4)
- Wilkerson, J. T., Jacobson, M. Z., Malwitz, A., Balasubramanian, S., Wayson, R., Fleming, G., & Lele, S. K. (2010). Analysis of emission data from global commercial aviation: 2004 and 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 6391-6408. Retrieved from <http://doi.org/10.5194/acp-10-6391-2010>
- World Health Organization. (2005). Who air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. *Global Update 2005 Summary of Risk Assessment*.
- Wuebbles, D., Gupta, M., & Ko, M. (2007). Evaluating the Impacts of Aviation on Climate Change. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 88(14), 157. Retrieved from <http://doi.org/10.1029/2007EO140001>
- Zurich Airport. (2014). Aircraft Ground Handling - Methodology and Emission Factors. *Airport Design and Operation*.



Interacción del transporte aéreo en las operaciones multimodales. Proyecto multimodal de percederos vía Panamá



Andrés Carlos Bolaños Riesen⁴

Resumen

El dinamismo de los mercados actuales y los niveles de exigencia de la industria requieren del desarrollo de nuevas modalidades de transporte que permitan el movimiento seguro y rentable de las mercancías.

Actualmente las empresas dedicadas al transporte de carga, en busca de suplir dicha necesidad, trabajan en el diseño de soluciones multimodales de transporte enfocadas a una rentabilidad para todos los actores involucrados, cumpliendo en todo momento con las necesidades de los diversos productos a transportar y de igual forma cumpliendo con los acuerdos comerciales entre vendedor y comprador.

El diseño de operaciones multimodales requiere de sinergias entre las diversas modalidades de transporte a utilizar, enfocados en los aspectos de costos, tiempos de tránsito y gestión de operaciones.

El transporte aéreo forma parte integral de las operaciones multimodales debido a que añade valor al desarrollo de los servicios debido a sus características de precisión en las operaciones y la administración de los tiempos de gestión.

Palabras clave: sinergias, integral, precisión, conocimiento, rentabilidad, administración.

Introducción

Para 2018 la industria del transporte de carga que se ve presionada por un mercado que cada día tiene mayores exigencias y que se encuentra en una constante transformación. Dentro de estas exigencias, se observan las empresas con un enfoque de precios bajos y que a la vez exigen altos niveles de servicio a las diferentes empresas que ofrecen los servicios de transporte.

Las empresas logísticas debido al escenario actual tienen el gran reto de suplir los requerimientos del mercado en cuanto a costos y calidad de los servicios, pero manteniendo rentabilidad en sus propias gestiones. Este escenario obliga a las empresas a dejar atrás la forma convencional de transportar las mercancías buscando nuevas modalidades que integren las bondades de cada una

⁴ Gerente comercial para United Airlines cargo para Panamá y Guatemala. Ha desarrollado su carrera logística de aproximadamente 21 años en empresas como el grupo A.P. Moller Maersk, Copa Airlines, entre otros, se desempeña como docente en Universidades de Panamá, México y Colombia desde el 2006. Apasionado en el mundo logístico y fiel creyente en la logística integral. Correo electrónico: andrescbolanos@gmail.com



de ellas. De igual forma, esta búsqueda las obliga a incrementar los niveles de comunicación entre los diversos actores, con el fin de ser más eficientes y precisos.

El principal reto que existe a 2018, se basa en una industria que no cuenta con una cultura con enfoque integral. Cada actor dentro de las operaciones logísticas se enfoca en cumplir con sus objetivos bajo un enfoque independiente. Cabe resaltar que este tipo de enfoque individual perjudica a los diversos personajes que interactúan entre sí como gestores del transporte, y a la vez afectan a los clientes en ambos extremos de la cadena de transporte.

Una vez identificados y canalizados los retos, se inicia el desarrollo de soluciones multimodales que están orientadas a brindar alternativas basadas en el cumplimiento de las necesidades comerciales de los clientes y a su vez de acuerdo a las necesidades de los productos a transportar.

Es de relevancia el mencionar que el transporte aéreo juega un papel supremamente importante dentro de las gestiones multimodales, ya que por una parte obliga a las empresas a realmente maximizar los espacios, estructurar de forma precisa las operaciones y administra de forma correcta el factor tiempo, el cual es crítico en la industria logística.

A continuación, se revisan los principales elementos tomados en cuenta para el desarrollo de una solución de transporte multimodal para el transporte de productos perecederos, utilizando a Panamá como un *hub* de distribución. De igual forma analizaremos la importancia del transporte aéreo dentro de dicho proyecto.

Metodología y marco de referencia

El desarrollo de este documento está basado en la experiencia obtenida durante el diseño de una alternativa de transporte multimodal para el manejo de productos perecederos. Dentro del proyecto se manejó la modalidad marítima-aéreo.

Uno de los principales parámetros por los cuales surgió la necesidad de desarrollar una alternativa multimodal, fue debido a que las alternativas actuales no cubrían las necesidades específicas de los productos ni los requerimientos en cuanto a las responsabilidades comerciales de los clientes.

Otro punto de mucho valor radica en el hecho de que para el desarrollo del proyecto fue necesario identificar, organizar y entender los diversos procesos presentes en las operaciones, los cuales a su vez debían ser comunicados a los diferentes actores, con el fin de gestionar bajo un concepto integral.

Es importante señalar que el desarrollo de este tipo de servicios supone realizar gestiones fuera de lo regular, rompiendo con paradigmas, integrando actores y conociendo los productos a transportar.

Planteamiento del escenario

El desarrollo de servicios multimodales supone la alineación de diversos elementos de una forma precisa, con lo cual se logra cumplir con los diversos requerimientos, no solo de los clientes, sino también de los diversos proveedores involucrados.



Cabe señalar que el transporte aéreo, debido a su precisión, sirve como marco de referencia para la estructuración de los diversos procesos.

Otro elemento que marcaba fuertemente el nivel de dificultad del desarrollo del proyecto era lo referente al tipo de producto a transportar, ya que el manejo de productos perecederos supone la inclusión de elementos adicionales dentro del listado regular de requerimientos.

Origen del proyecto

En la mayoría de los casos el diseño de soluciones multimodales ocurre por medio de investigación y análisis, sin embargo, puede ocurrir en algunas ocasiones que la idea principal se materialice a través de una operación que ha salido de su estándar regular. Esta desviación fuera de lo programado obliga a los operadores a resolver y en muchas ocasiones volverse creativos con el propósito de corregir el curso de la operación. Dicha creatividad si se maneja de forma profesional y objetiva abre las puertas al desarrollo de nuevas opciones de transporte.

En el caso específico del proyecto en mención, surgió la oportunidad de desarrollo debido a un error en el servicio de transporte marítimo de siete contenedores con productos perecederos, los cuales no fueron abordados en el barco reservado. Dicha situación obligó a cambiar a la modalidad aérea del producto contenido en los contenedores, con el fin de evitar un fuerte reclamo.

Una vez se realizó la operación, los resultados fueron tan positivos que se vio la posibilidad de trabajar de manera formal en un proyecto basado en la experiencia previa.

Los actores

Existen diversos actores involucrados dentro de las gestiones multimodales, los cuales deben interactuar y mantener una comunicación precisa con el fin de lograr el éxito de las operaciones.

El principal actor es el cliente en ambos extremos (origen y destino). Ellos tienen el importante papel de proporcionar de forma clara dos elementos: el primero se refiere a las necesidades comerciales que tienen en cuanto a tiempos y costos; el segundo tiene que ver con presentar las características del producto a transportar y sus necesidades específicas. De esta manera, el resto de los actores contarán con las herramientas necesarias para el desarrollo de la alternativa multimodal.

Otro de los actores de alta relevancia es el operador logístico, el cual es el encargado de entender los requerimientos específicos de los clientes y traducirlos en una solución de transporte alineando, no solo de las diferentes modalidades, sino también a los diversos gestores de las operaciones de transporte.

Enfoque del proyecto

Como ya se ha mencionado anteriormente, el proyecto buscaba suplir las necesidades del producto, lo cual nos llevaba a desarrollar bajo un enfoque operativo, y a la vez cumplir con los



requerimientos de los acuerdos entre comprador y vendedor, orientándonos al desarrollo bajo un enfoque comercial.

Enfoque comercial

El desarrollo bajo el enfoque comercial estaba amparado principalmente a cumplir con los compromisos acordados entre comprador y vendedor en lo referente a costos de transporte y tiempos de entrega.

El entendimiento de estos dos requisitos sentaba las bases para la estructuración del enfoque operativo, o en otras palabras, el desarrollo de la plataforma de servicio.

Enfoque operativo

Al momento que tenemos claridad en lo que nuestro cliente necesita, y a la vez lo que el producto por características requiere, debemos proceder a armar la estructura operativa y de gestión que servirá como plataforma de servicio del producto a ofrecer.

El enfoque operativo es tal vez el más difícil de desarrollar, debido a la cantidad de elementos, gestiones y personajes que se involucran dentro de las gestiones de transporte. El lograr sinergias entre cada uno de estos elementos sugiere un reto importante para el desarrollo del proyecto.

Podemos decir, sin temor a equivocarnos, que la base del éxito dentro del desarrollo del enfoque operativo es el tener claridad en lo siguiente:

- Actores que participan en la gestión total del transporte.
- Procesos por desarrollar.
- Tiempos utilizados en cada una de las actividades.
- Costos, cómo se aplican y qué validez tienen.
- Características de cada una de las modalidades a utilizar.
- Características de los diversos países en donde se movilizarán los embarques.

Al momento que se logra plasmar lo antes mencionado, se logra tener una visión clara para la creación de la plataforma operativa y de entrega de servicio.

Mapeo de procesos

Una de las principales tareas dentro del desarrollo del proyecto tenía que ver con lograr una visión muy clara de cada uno de los procesos que se tenían que ejecutar para lograr un movimiento seguro de productos perecederos bajo una modalidad que combinaba modos de transporte. La mejor manera de lograr tener dicha visión completa era a través de la realización de un recorrido en tiempo real a través de todos los procesos y de las diversas áreas de la gestión.

Los resultados de todo lo que se pudo conocer dentro de lo que se percibía y de lo que en realidad sucedida fue impactante. Se logró entender que la industria actual del transporte en sus



diversas áreas se maneja mucho por uso y costumbre, contrario a la estructuración que se supone que debería tener.

Prueba del concepto

Una vez establecidos los enfoques bajo los cuales se desarrollaría el proyecto, se procedió a establecer los procesos siempre bajo un enfoque integral. Este enfoque integral supone el dar alta importancia al entendimiento de que cada proceso ejecutado por cada actor tenía el potencial de contribuir positiva o negativamente al flujo de las gestiones.

Ya definidos los procesos, se procede a realizar la prueba del concepto, que en otras palabras era el ejecutar la operación de transporte multimodal.

Es importante señalar que durante este proceso de prueba de concepto se recibió el total apoyo del cliente, ya que de haber daños en el producto, este no reclamaría sobre dicho producto dañado. Bajo esta premisa, los costos de transporte que se cobrarían al cliente serían únicamente los costos reales, sin contemplar ganancias para operador logístico.

Otro de los aspectos relevantes del proceso de prueba del concepto era el poder cuantificar los tiempos de ejecución, con el fin de lograr hacer los ajustes pertinentes en busca de operaciones *just in time*. Debemos tomar en cuenta que el factor tiempo es de vital importancia para la calidad de los productos. Tomando esto en consideración, el enfoque de lograr los menores tiempos de tránsito, sin afectar los productos, era una de las prioridades.

Hay que tomar en cuenta que uno de los pilares fundamentales dentro de la prueba del concepto es el enfoque de mejora continua, en donde el proceso de la constante búsqueda de hacerlo mejor cada día forma parte de un enfoque continuo.

Resultados y beneficios

Una vez que se comprobó que el concepto funcionaba y que, contrario a lo que muchas veces la lógica indicaba, se pudo observar una cantidad importante de beneficios que no solo eran favorable para los clientes, sino que también para cada uno de los actores que participaban en la gestión.

En el caso de los clientes se vieron beneficiados de la siguiente manera:

- Alternativas de transporte adicionales con capacidad para cuando los modos tradicionales estaban saturados en cuanto a espacio.
- Una alternativa que permitía mantener la calidad del producto, y que en algunos casos lograba hasta mejorar la calidad inicial del producto, bajo la cual fue entregado en el país de origen.
- Tener disponibilidad de una alternativa que, si se comparaba con una modalidad aérea, la cual era la que el cliente utilizaba regularmente, permitía ahorros importantes de hasta un 50 % en algunos de los casos.



En el caso de los transportistas pudimos obtener los siguientes beneficios:

- Rentabilidad en las operaciones de transporte por encima del 35 %.
- Maximización de segmentos de transporte en donde anteriormente el volumen era muy bajo y hasta inexistente.
- Generación de volúmenes adicionales en rutas marítimas específicas.
- A nivel interno de la compañía el desarrollo de conocimiento y nuevas competencias dentro del personal de gestión.

Como un resultado general se puede establecer este proyecto como guía para el desarrollo de otros tipos de transporte multimodal, y para el manejo de otros tipos de producto.

Aporte del transporte aéreo

Cuando analizamos las características propias de cada modalidad de transporte podemos decir grosso modo que la modalidad marítima presenta menos restricciones movilizandando grandes cantidades de mercancías, en donde el factor tiempo no es necesariamente el principal enfoque. Por el contrario, cuando hablamos del transporte aéreo, las características cambian, ya que contrario al marítimo en esta modalidad el factor tiempo es, en conjunto con un enfoque en la seguridad, uno de los principales parámetros a enfocarse. De igual forma otra de las características del transporte aéreo es que no es tan flexible en cuanto a los tipos de mercancía que pueden transportar y en cuanto a los volúmenes que se pueden manejar.

Basados en lo anteriormente expuesto, podemos decir que debido a las características específicas de la modalidad aérea, dicha industria está obligada a ser mucho más precisa en cuanto al manejo de los productos a través de una mayor estructuración de procesos, manejando siempre de forma precisa los tiempos de gestión. Dichos parámetros a seguir aportan mucha estructura y control a las operaciones multimodales.

Conclusiones

Luego de un periodo de aproximadamente cinco años, se logró establecer una nueva alternativa de transporte, la cual beneficiaba tanto a clientes como proveedores de servicio.

De igual forma se logró comprobar que era posible mantener la calidad de los productos a lo largo de la gestión de transporte, aplicando pequeñas modificaciones de los procesos poscosecha en áreas específicas de la cadena de transporte.

Un factor clave que marcó el éxito de todo el proyecto fue el lograr obtener conocimiento previo de los productos. Dicho conocimiento adquirido permitía ajustar los procesos de la modalidad a las necesidades del producto.

Podemos concluir que para el diseño de nuevas modalidades de transporte, como los servicios multimodales, los factores claves principales son el conocimiento total del producto a manejar, y adicionalmente el lograr una integración entre todos los actores de la gestión del transporte, incluyendo a los clientes tanto en origen como en destino.



Desafíos estratégicos en logística: la gestión de la confiabilidad humana en la cadena de suministros



Pedro Alejandro Baziuk⁵

Resumen

La confiabilidad, disponibilidad y eficiencia de la cadena de suministros, como sistema socio-tecnológico, implica el análisis y comprensión de los errores humanos asociados a los procesos involucrados en este sistema. La concepción moderna del error humano, como algo inherente e inevitable,

genera una serie de estrategias para el diseño de sistemas tolerantes, resilientes y menos vulnerables a la ocurrencia y propagación de errores humanos.

Palabras clave: error humano, confiabilidad humana, factores humanos, factores sociotecnológicos

Introducción

El propósito de este trabajo es explorar y analizar las posibles intervenciones y recomendaciones que se pueden generar a partir de la aplicación de los análisis de confiabilidad humana (del inglés: *Human Reliability Analysis* - HRA) en la gestión de riesgos en la cadena de suministros (del inglés: *Supply Chain Risk Management* - SCRM), algo que se podría sintetizar como gestión de la confiabilidad humana en la cadena de suministros (en inglés *Human Reliability Management in Supply Chain* - HRMSC), término presentado por primera vez en este artículo. Este trabajo pretende ser una introducción y conjunción entre ambas disciplinas, que permita iniciar estudios en las numerosas posibilidades que genera su integración.

En la primera parte de este trabajo se explorarán y analizarán los marcos conceptuales de ambas subdisciplinas: la confiabilidad humana y, por otro lado, la gestión de riesgos en la cadena de suministros. Se realizará un recorrido rápido del surgimiento de los estudios en ambos casos, para destacar los paradigmas, objetivos y componentes principales en los modelos aplicados.

⁵ Ingeniero Industrial, Especialización en Gestión de Pequeñas y Medianas empresas, Doctorado en Ingeniería, Docente Investigador Categoría III, Becario Posdoctoral CONICET (2015-2017), Titular Investigación Operativa Aplicada (a partir de 2018), Titular Física Aplicada a la Logística (desde 2017), Jefe de Trabajos Prácticos Física 1 FING UNCUIYO (desde 2010). Investigador Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza-Argentina. Correo electrónico: pbaziuk@fing.uncu.edu.ar



Luego se realizará una descripción de las taxonomías de fallas, por un lado, de los errores humanos, y por otro lado, de los riesgos en la cadena de suministro. Esta similitud epistemológica, podría decirse reduccionista, entre ambas disciplinas es la antesala de una integración entre ambas, ya que demuestra una intencionalidad similar en ambos tipos de análisis. La clasificación y tipificación de riesgos en las cadenas de suministro ha sido abordada por numerosos autores, no obstante, su estudio taxonómico no ha sido hasta ahora mencionado. El estudio exhaustivo de esta taxonomía y su posible generalización es un área de vacancia dentro de los análisis de riesgos en cadenas de suministros.

También se explorarán y describirán las estrategias resultantes de ambos modelos, que surgen como recomendaciones para la mitigación de errores humanos y riesgos de interrupción del flujo de materiales respectivamente. Allí es donde comienzan a funcionar sinérgicamente ambos estudios, posibilitando el diseño de sistemas tolerantes, resilientes y menos vulnerables a la ocurrencia y propagación de errores humanos en la cadena de suministros.

Finalmente se aplicarán dos metodologías propias de la confiabilidad humana al análisis de riesgo en cadenas de suministro: una de ellas a partir del análisis de factores de riesgo y la otra tomando la cadena de suministro como un sistema socio-tecnológico. La contrastación de estas técnicas con resultados empíricos valida la aplicación de la confiabilidad humana en la cadena de suministro.

Marcos conceptuales

En el presente apartado se analizan los paradigmas de la confiabilidad humana y de la gestión de riesgos en la cadena de suministros, con el propósito de explorar y analizar sus diferencias y similitudes que permitan la integración de ambos.

a. El paradigma de la confiabilidad humana

El término *Human Reliability Assessment* (HRA), evaluación o análisis de la confiabilidad humana, fue introducido por primera vez en 1962 por Munger (Munger, Smith y Payne, 1962). Se puede definir como la probabilidad que una tarea o trabajo sea completado satisfactoriamente por un individuo en un estado específico de la operación del sistema en un tiempo requerido mínimo (si es que hay requisitos de tiempo) (Meister, 1989).

En el sentido negativo del término, aparece el llamado “error humano”, que se define como “la falla en la ejecución de una tarea dada (o la ejecución de una tarea prohibida), que puede causar daños a los equipos o interrumpir la secuencia de operaciones” (Hagen, 1976).



Prácticamente todos los métodos y enfoques HRA comparten el supuesto de que es significativo usar el concepto de “error humano”, por lo tanto, también es significativo el desarrollo de formas para estimar probabilidades de “error humano”. Como consecuencia de esto, numerosos estudios se han realizado para producir conjuntos de datos o bases de datos que pueden ser utilizados como base para la determinación de probabilidades de error humano. Este punto de vista prevalece a pesar de serias dudas expresadas por destacados científicos y profesionales de HRA y disciplinas afines. Una crítica general de HRA (Dougherty, 1990), por ejemplo, señala que muchos enfoques HRA se basan en supuestos altamente cuestionables sobre el comportamiento humano.

El nacimiento de los métodos de HRA datan del año 1960, pero la mayoría de las técnicas para la evaluación del factor humano, en términos de propensión a fallar, se han desarrollado desde mediados de los años 80. Las técnicas o enfoques de HRA se pueden dividir básicamente en dos categorías: primera y segunda generación. Actualmente, surgen las técnicas dinámicas de HRA o métodos de la tercera generación, entendido como una evolución de las generaciones anteriores (Di Pasquale, Iannone, Miranda y Riemma, 2013).

Los métodos de primera generación de HRA o métodos cuantitativos HRA, se basaron en las estadísticas, el más importante es THERP, basado en el análisis del árbol de fallas. Una gran cantidad de métodos y modelos de confiabilidad en la teoría clásica asume que todas las probabilidades son precisas (Kim y Bishu, 2006), es decir, que cada probabilidad implicada es perfectamente determinable. La probabilidad de error humano puede ser asignada sobre la base de las características de la tarea del operador y luego modificada por factores que determinan el rendimiento (su sigla en inglés PSF: *Performance Shaping Factors*). En la primera generación de HRA, las características de una tarea, representados por HEPS, se consideran como principales factores; el contexto, que está representado por PSF, se considera un factor de menor importancia en la estimación de la probabilidad de fallo humano (Kim y Bishu, 2006). Esta generación se concentra hacia la cuantificación, en términos de éxito/fracaso de la acción, con menos atención a la profundidad de las causas y razones de la conducta humana, tomados de las ciencias del comportamiento.

Entre las técnicas de primera generación encontramos: el juicio de probabilidad absoluta (sus siglas en inglés son APJ: *Absolute Probability Judgment*), la evaluación de los errores humanos y la técnica de reducción (sus siglas en inglés HEART: *Human Error Assessment and Reduction Technique*), la información de los datos de error humano justificado (sus siglas en inglés JHEDI: *Justified Human Error Data Information*), el análisis de la confiabilidad humana probabilístico (sus siglas en inglés PHRA: *Probabilistic Human Reliability Analysis*), sistema de árbol de la acción del operador (sus siglas en inglés OATS: *Operator Action Tree System*) y el método del índice de probabilidad de éxito (sus siglas en inglés SLIM: *Success Likelihood Index Method*). Entre estos, el método más popular y eficaz es THERP, caracterizado, como otros enfoques de primera



generación, por un tratamiento matemático preciso de la probabilidad y las tasas de error. La base de THERP es el modelado del árbol de eventos, donde cada rama representa una combinación de las actividades humanas, las influencias sobre las actividades y los resultados de estas actividades.

Las principales características de los métodos de primera generación se pueden resumir de la siguiente manera (Kim, 2001): representación binaria de las acciones humanas (éxito/fracaso), atención en la fenomenología de la acción del hombre, baja atención en las acciones cognitivas humanas (falta de un modelo cognitivo), énfasis en la cuantificación de la probabilidad de realización incorrecta de las acciones humanas, dicotomía entre los errores de omisión y comisión, tratamiento indirecto de contexto.

THERP y los enfoques desarrollados en paralelo -como HCR (Human Cognition Reliability) desarrollado por Hannaman, Spurgin y Lukic en 1985- describen los aspectos cognitivos del desempeño del operador con el modelado cognitivo del comportamiento humano, conocido como modelo de habilidad-regla-conocimiento (sus siglas en inglés SRK: *Skill-Rule-Knowledge*) (Rasmussen, 1983). Este modelo, que se basa en la clasificación de la conducta humana, se divide en una conducta basada en habilidades prácticas, en normas y en conocimiento, dependiendo del nivel cognitivo utilizado. La atención y el pensamiento consciente que un individuo le da a las actividades disminuyen desde el tercer al primer nivel. Este modelo de comportamiento se ajusta muy bien con la teoría del error humano de Reason (1990), según la cual hay varios tipos de errores, en función del resultado de acciones llevadas a cabo con la intención de realizarlas o no.

Reason distingue entre: deslices, destinados a la ejecución de errores que se producen en el nivel de habilidad; lapsus, es decir, los errores en la ejecución derivados de la falla de la memoria; y las equivocaciones, los errores cometidos durante la puesta en práctica de la acción. En THERP, en cambio, las malas acciones se dividen en errores de omisión y errores de comisión, que representan, respectivamente, la falta de realización de las operaciones necesarias para conseguir el resultado y la ejecución de una operación que no se refiera a la tarea en cuestión, lo que impide la obtención del resultado (Hollnagel, 1998).

Los métodos HRA primera generación ignoran los procesos cognitivos que subyacen a la conducta humana, de hecho, poseen un modelo cognitivo sin realismo humano y psicológicamente inadecuado.

A menudo son criticados por no haber considerado el impacto de factores como el medio ambiente, los factores organizacionales y otros PSF pertinentes, errores de comisión, y por no utilizar métodos apropiados para juzgar a los expertos (Hollnagel, 1998; Sträter, Dang, Kaufer y Daniels, 2004; Mosleh y Chang, 2004). Hallnagel (1998) señaló que “todas las insuficiencias de las metodologías anteriores de HRA, a menudo conducen a los analistas a realizar evaluación de



HEP deliberadamente altos y con mayores límites de incertidumbre, para compensar, al menos en parte, estos problemas” (p. 10). Esto claramente no es una solución deseable.

A principios de 1990, la necesidad de mejorar los métodos de HRA genera una serie de importantes actividades de investigación y desarrollo en todo el mundo. Estos esfuerzos dieron lugar a grandes avances en los métodos de primera generación y el nacimiento de nuevas técnicas, identificadas como segunda generación. Estos métodos HRA fueron, en un primer momento, imprecisos y poco claros. Mientras que los métodos HRA de primera generación son principalmente enfoques conductuales, los métodos HRA de segunda generación aspiran a ser de tipo conceptual (Mosleh y Chang, 2007).

La separación entre las generaciones es evidente en el abandono del enfoque cuantitativo del análisis probabilístico de riesgo (sus siglas en inglés Para: *Probabilistic Risk Analysis*) o análisis probabilístico de seguridad (sus siglas en inglés PSA: *Probabilistic Safety Analysis*) en favor de una mayor atención a la evaluación cualitativa de los errores humanos. La atención se centró en los aspectos cognitivos de los seres humanos, las causas de los errores en lugar de su frecuencia, el estudio de la interacción de los factores que aumentan la probabilidad de error y la interdependencia de los PSF.

Los métodos HRA segunda generación (como CREAM: *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* o ATHEANA: *A Technique for Human Event Analysis*) se basan en modelos de conducta humana. Esta generación de métodos hace énfasis en la caracterización cualitativa del error humano, describiendo las raíces y las funciones cognitivas humanas involucradas.

Es evidente que cualquier intento de comprensión de la conducta humana debe incluir el papel de la cognición humana, definida como el acto o proceso de conocimiento que incluye la conciencia y el juicio del operador humano. Desde la perspectiva del analista de HRA, la solución inmediata de tomar en consideración la cognición humana en los métodos de HRA fue la introducción de una nueva categoría de error: “error cognitivo”, que se define tanto como la falta de una actividad que es predominantemente de naturaleza cognitiva y como la causa inferida de la actividad que falla. Por ejemplo, en CREAM, desarrollado por Erik Hollnagel en 1993, mantiene la división entre las causas y las consecuencias lógicas de un error humano. Las causas de la mala conducta (genotipos) son las razones que determinan la ocurrencia de ciertos comportamientos y los efectos (fenotipos) están representadas por las formas incorrectas del proceso cognitivo y acciones inapropiadas.

Los modelos cognitivos han sido desarrollados para representar el proceso lógico-racional del ser humano e incluir la dependencia con los factores personales (como el estrés, la incompetencia, etc.) y por la situación en la que se desempeña (sistema de conducción normal, condiciones anormales, o incluso situaciones de emergencia), y los modelos de interfaz hombre-máquina, que reflejan el sistema de control del proceso de producción (Marsden y Hollnagel,



1996). En esta perspectiva, el hombre debe ser visto en un sistema integrado, hombres-tecnología-empresa (sus siglas en inglés MTO: *Man-Technology-Organization*), es decir, un equipo de operadores (hombres) que colaboran para lograr el mismo objetivo, que interviene en el proceso mecánico (tecnología) dentro de un sistema de organización y gestión de la empresa (organización) y, en conjunto, representan los recursos disponibles.

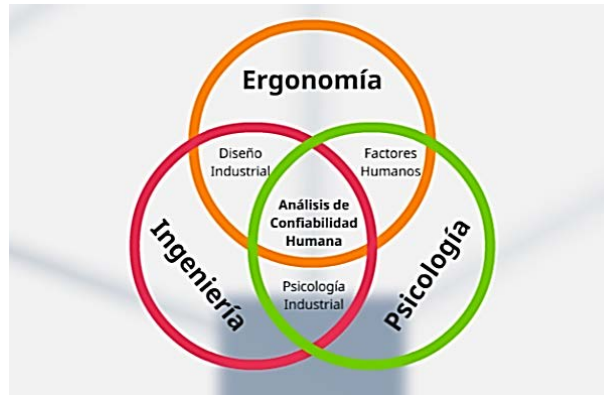
El modelo de operador CREAM es más importante y menos simplista que el de los enfoques de primera generación. El modelo cognitivo utilizado es el modelo de control contextual (sus siglas en inglés COCOM: *Contextual Control Model*), basado en la suposición de que el comportamiento humano se rige por dos principios básicos: la naturaleza cíclica de la cognición humana y la dependencia de los procesos cognitivos de contexto y el entorno de trabajo. El modelo se refiere al paradigma IPS que considera por separado las funciones cognitivas (percepción, la interpretación, la planificación y la acción) y sus mecanismos de conexión y los procesos cognitivos que rigen la evolución (Hollnagel, 1998; Kim y Bishu, 2006). En tanto que, el análisis de plantas estandarizadas, método de análisis de la confiabilidad de riesgo humano (sus siglas en inglés SPAR-H: *Standardised Plant Analysis Risk-Human reliability analysis method*) (Boring y Blackman, 2007) se basa en un modelo de procesamiento de la información explícita de la conducta humana, derivada de las ciencias del comportamiento.

Otra diferencia entre las generaciones se refiere a la elección y el uso de PSF. Ninguno de los primeros enfoques HRA trata de explicar cómo los PSF ejercen su efecto en el rendimiento y, además, PSF -tales como los métodos de gestión y actitudes, factores organizativos, las diferencias culturales y de comportamiento irracional- no se tratan adecuadamente en estos métodos. Los PSF en la primera generación se derivaron principalmente centrándose en el impacto ambiental de los operadores, mientras que los PSF en la segunda generación fueron obtenidos al centrarse en los efectos cognitivos de los operadores (Lee, Kim, Ha y Seong, 2011). Los PSF de ambas generaciones se revisaron y se recogen en una sola taxonomía de rendimiento de los factores que influyen para HRA (Kim y Jung, 2003).

Entre los métodos de la segunda generación se pueden mencionar: una técnica para el análisis de errores humanos (sus siglas en inglés ATHEANA: *A Technique for Human Event Analysis*), simulación cognitiva ambiental (sus siglas en inglés CES: *Cognitive Environmental Simulation*), la evaluación conexionismo de confiabilidad humana (sus siglas en inglés CAHR: *Connectionism Assessment of Human Reliability*) y el método de evaluación de la realización de misiones operacionales para la seguridad (de sus siglas en francés MERMOS: *Méthode d'Évaluation de la Réalisation des Missions Opérateur pour la Sécurité*).



Figura 1. Paradigma de la confiabilidad humana



b. El paradigma de la gestión de riesgos en la cadena de suministros

La gestión de riesgos en la cadena de suministros (del inglés: *Supply Chain Risk Management - SCRM*) se puede definir como la gestión del riesgo de la cadena de suministro a través de la coordinación o la colaboración entre los socios de la cadena de suministro, con el fin de garantizar la rentabilidad y la continuidad, diferenciándose de la gestión de riesgo tradicional por orientarse a identificar y reducir el riesgo, no solo a nivel de la empresa, sino que se centra en cadenas de suministro completas (Khojasteh-Ghamari y Irohara, 2018). Es una disciplina emergente, si bien los primeros estudios de riesgo en una cadena de suministro datan de 1964, no es hasta hace solo algunos años que se independiza como disciplina y comienzan a aparecer libros y estudios específicos de la temática (Tang, 2006).

El paradigma de análisis de la gestión de riesgos en la cadena de suministros tiene aspectos tridimensionales (Brindley, 2017). Una primera dimensión es la unidad de análisis: la unidad más pequeña son las actividades logísticas individuales, compañías logísticas, configuraciones diádicas (empresas líderes y seguidoras), cadena de suministro y la unidad de análisis más amplia, una red completa de suministros. Una segunda dimensión es el proceso de gestión de riesgos hasta llegar a la administración de negocios: identificación de riesgos, análisis y evaluación de riesgos, administración de riesgos, administración estratégica de negocios. Por último, una tercera dimensión es el tipo de riesgo e incertidumbre: accidentes operacionales, catástrofes operacionales, incertidumbres estratégicas.

El principal riesgo para una cadena de suministro es la interrupción del flujo de materiales (Waters, 2011). De este precepto es fácil inferir que el enfoque que adquiere la gestión de riesgos en la cadena logística acompaña la estructura y funciones a lo largo del flujo de materiales. La mayoría de los autores en la disciplina coinciden en el intento de identificar los riesgos asociados a las funciones principales de este flujo de materiales: gestión del transporte, gestión de almacenes, manejo de materiales, gestión de órdenes, gestión de compras, servicios al



consumidor, gestión de la información; o de sus principales actividades: diseño de la cadena de suministros, compras y abastecimiento, transporte de abastecimiento, recepción de pedidos, almacenamiento, control de existencias, manejo de materiales, recolección de pedidos, transporte de distribución, reciclado y disposición de residuos, comunicación, etc. Esta identificación de riesgos permite generar recomendaciones que justamente apuntan a la disponibilidad y mantenibilidad de este flujo de materiales.

Las decisiones estratégicas y tácticas de una empresa afectan la medida en que su cadena de suministro puede mitigar las consecuencias de los eventos adversos. Más allá de la reducción de los costos, la administración efectiva de la cadena de suministro también debe involucrar el diseño de una red de suministro robusta. La búsqueda de ventajas competitivas lleva a las empresas a extender sus cadenas de suministro y a estrategias de eficiencia que no suelen estar acompañadas de un análisis de riesgo. Tendencias como la globalización, la fabricación ajustada, el abastecimiento único y la deslocalización aumentan las complejidades e interdependencias en las cadenas de suministro.

Pero una tendencia más preocupante es que los gerentes de logística cambien las operaciones para brindar un mejor servicio y eficiencia, sin considerar las consecuencias sobre el riesgo. Como resultado, las cadenas de suministro son cada vez más eficientes, pero a costa de aumentar la vulnerabilidad. Incluso cuando el riesgo individual para cada miembro de una cadena es pequeño, el efecto acumulativo sobre los cientos o miles de miembros en una cadena grande se vuelve muy significativo.

Esto se puede evidenciar en la encuesta realizada por Aberdeen Group, que encontró que el 82 % de los gerentes informaron interrupciones en las cadenas de suministro en los dos años anteriores (Minahan, 2005). Las principales causas fueron: productos de mala calidad o dañados 50 %, entregas extraviadas o tardías 49 %, aumentos inesperados en los costos de suministro 47 %, tiempos de entrega más largos 33 %, restricciones en la capacidad de suministro 32 %.

El problema de los nuevos métodos de logística que aumentan el riesgo de la cadena de suministro es que esto no ocurre porque los gerentes deciden positivamente trabajar con niveles más altos de riesgo, sino porque simplemente no están considerando los riesgos y los están incluyendo en sus cálculos. Por ejemplo, la gestión de inventarios, los gerentes dicen que inventarios pequeños en realidad reducen el riesgo, ya que hay menos posibilidades de existencias no vendidas, obsolescencia, daños, deterioro y todos los demás riesgos de las existencias acumuladas. Esto es indudablemente cierto, por lo que existe una aparente paradoja, con métodos diseñados para reducir algunos riesgos que realmente aumentan a otros. Jüttner (2005) encontró que los factores que probablemente aumentarían la vulnerabilidad de la cadena de suministro son la globalización (reportada por el 52 % de los gerentes), reducción de los niveles de stock (51 %), menor cantidad de proveedores (38 %) y tercerización (30 %).



Taxonomía de errores humanos y riesgos de interrupción del flujo de materiales

En esta sección se analizarán los tipos de riesgos y fallas que ambas disciplinas, HRA y SCRM, han desarrollado. Como se podrá observar, el énfasis de la gestión de riesgos en la cadena de suministros está en la identificación de los tipos de riesgos y su análisis, es decir, el desarrollo de una taxonomía de riesgos. De igual manera los análisis de confiabilidad humana ponen énfasis en una taxonomía de errores humanos. Estos focos epistemológicos pueden ser asociados al clásico reduccionismo científico, en el intento de describir las partes constitutivas de un todo para luego comprender su funcionamiento.

a. Taxonomías de errores humanos en los análisis de confiabilidad humana

En muchas áreas de conocimiento usan clasificaciones o taxonomías como una forma de organizar el conocimiento. En el área del error humano esta clasificación tiene valor teórico y práctico. Las taxonomías que enfatizan en conductas observables tienen valor más práctico. Pueden ser usadas en retrospectiva para determinar puntos de debilidad en el diseño, o en prospectiva para predecir posibles errores. En la industria de la salud, dada la gran diversidad de procedimientos y circunstancias, es difícil establecer una taxonomía.

Las taxonomías que enfatizan en los aspectos cognitivos tienen valor predictivo. Sin embargo, predecir el error humano es una tarea difícil. En el proceso de establecer asignaciones entre el contexto y la falibilidad humana, existen numerosas capas de conjeturas producidas por las situaciones complejas y multidimensionales que se presentan en los trabajos actuales y la incertidumbre asociada a los objetivos, intenciones y estados emocionales y atencionales humanos.

Kirwan (1998) habla de técnicas taxonómicas y específicas que pueden ser genéricas (como THERP), o específicas y relacionadas con una industria específica (como SRS-HRA), o específicas y relacionadas con un tipo de error (como INTENT). Estas técnicas son esencialmente basadas en la experiencia, por tanto, tendrán cierta validez contextual.

Rasmussen (1983) en su modelo SRK (por sus siglas en inglés: *Skill, Rules, Knowledge*) clasifica la actuación humana de acuerdo al grado de conciencia o control cognitivo que se presta al realizarla, si es un bajo nivel de conciencia (acciones automatizadas) el comportamiento estará basado en habilidades, si el nivel de conciencia es medio el comportamiento estará basado en reglas, y si tiene un alto nivel de conciencia estará basado en conocimientos.

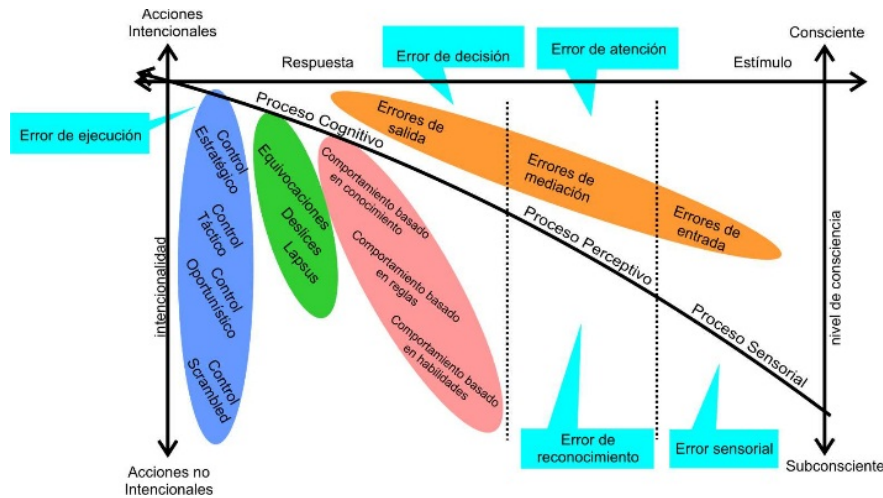
El método CREAM (*Cognitive Reliability and Error Analysis Method*) creado por Hollnagel (1998) se aparta del concepto de error humano y por lo tanto de una taxonomía, luego la probabilidad de que algo se realice incorrectamente (Hollnagel lo llama “anhelado error humano”) está determinado más bien por las condiciones que por las probabilidades de error inherentemente



humanas. La probabilidad que el desempeño como un todo falle o sea no satisfactorio está descrito en términos del “grado de control” que un operario (o un equipo) tiene sobre una situación.

En la figura 2 se resumen las taxonomías de Reason (color verde), Rasmussen (color rosado), Payne y Altman (color naranja), Wickens (color celeste) y CREAM (color azul). Como se puede observar, existen zonas grises donde ninguna de las taxonomías clasifica errores. Este hecho fue demostrado empíricamente por Wiegmann y Shappell (1997). El resultado de ese estudio fue que el 19.37 % de los factores causales no se pueden categorizar de acuerdo con el modelo de información de Wickens; el 11.57 % de acuerdo al modelo de Rasmussen y el 15.73 % en el caso del modelo de Reason.

Figura 2. Resumen de las taxonomías de error humano y clasificaciones de la conducta humana

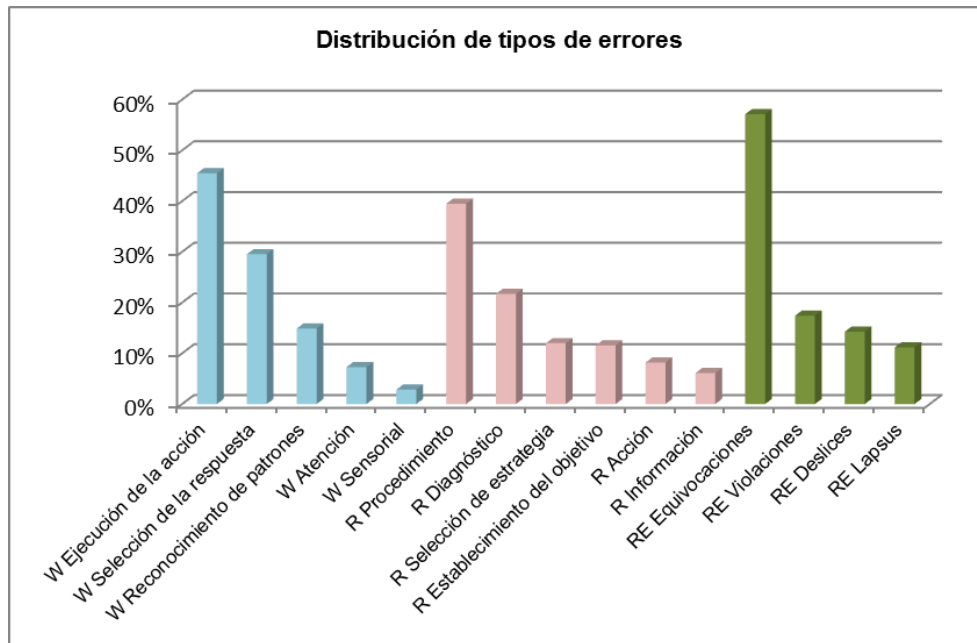


Fuente. Baziuk, Rivera y Nuñez McLeod (2014)

Otro resultado interesante del trabajo de Wiegmann y Shappell es la distribución de errores de acuerdo con las taxonomías, que se muestran en la siguiente figura.



Figura 3. Distribución de errores de acuerdo con las taxonomías de Wickens (W), Rasmussen (R) y Reason (RE)



Fuente. Wiegmann y Shappell (1997).

b. Taxonomía de riesgos y fallas en la gestión de riesgos en la cadena de suministros

Hendricks y Singhal (2003) encontraron que el 34 % de las interrupciones en la cadena de suministro se originó a partir de operaciones internas, lo que significa que la empresa misma fue responsable de las interrupciones; los proveedores fueron los principales responsables del 15 % de las interrupciones, los clientes del 13 %, la naturaleza y el gobierno el 4 % cada uno y varias combinaciones de ellos el 6 %. Descubrieron que la escasez de piezas era la razón principal de las interrupciones en la cadena de suministro (en el 22 % de los incidentes), seguidas por cambios repentinos en la demanda (9 %), cambios en los pedidos por parte de los clientes (9 %) y diversos problemas de producción (9 %), problemas de desarrollo (4 %) y calidad (3 %).

Una breve encuesta (Scarborough, 2007) sugiere que los gerentes suelen estar más preocupados por los siguientes tipos de interrupciones: pérdida de los sistemas de tecnología de la información (76 %), pérdida de los sistemas de telecomunicación (67 %) ; daño por fuego a las instalaciones (52 %); daño a la imagen corporativa (47 %), pérdida de personal calificado (42 %), salud y seguridad de los empleados (41 %), interrupción de la cadena de suministro (39 %), acceso a las instalaciones (32 %), un incidente ambiental (31 %), clima severo (27 %), seguridad del producto (16 %), daño terrorista (14 %).

El riesgo en sí mismo dentro del contexto de la cadena de suministro puede clasificarse en varias dimensiones (Zsidisin & Ritchie, 2009):



- 1) Interrupciones en el suministro de bienes o servicios, incluida mala calidad, que causa tiempo de inactividad y consecuente falla en satisfacer los requisitos del cliente a tiempo.
- 2) La volatilidad en términos de precio puede generar dificultades para transmitir los cambios de precios al cliente y potencialmente tener consecuencias en la pérdida de beneficios.
- 3) Los productos o servicios de baja calidad, ya sea *upstream* o *downstream*, pueden tener un impacto en el nivel de satisfacción del cliente con consecuencias para ingresos futuros y posiblemente reclamos más inmediatos por compensación financiera.
- 4) La reputación de la empresa, a menudo generada por cuestiones que no están directamente relacionadas con la cadena de suministro en sí misma, puede presentar riesgos. Los comentarios inadvertidos de los altos ejecutivos o la falta de aprobación de ciertos protocolos pueden dañar la reputación de la organización.

De acuerdo con Donald Waters (2011), los riesgos en una cadena de suministros se pueden clasificar en riesgos internos a las organizaciones, externos a las organizaciones o externos a la cadena de suministro (ver tabla 1).

Tabla 1. Tipos y subtipos de riesgos en la cadena de suministros

Tipos de riesgos en las cadenas de suministros	Subtipos	Principales Causas
Los riesgos internos surgen de las operaciones dentro de una organización	<ul style="list-style-type: none"> - Riesgos inherentes en las operaciones: como accidentes, la fiabilidad de los equipos, la pérdida de un sistema de tecnología de la información, errores humanos y problemas de calidad. - Riesgos que surgen más directamente de las decisiones de los gerentes: como la elección del tamaño de los lotes, los niveles de existencias de seguridad, los problemas financieros y los plazos de entrega. 	Se producen por las vulnerabilidades internas de la organización, fallas en la administración, fallas en la toma de decisiones, fallas en los equipos.
Los riesgos de la cadena de suministro son externos a las organizaciones, pero dentro de la cadena de suministro	<ul style="list-style-type: none"> - Riesgos de los proveedores: confiabilidad, disponibilidad de materiales, plazos de entrega, problemas de entrega, acción industrial, etc. - Riesgos de los clientes: demanda variable, pagos, problemas con el procesamiento de pedidos, requisitos personalizados, etc. 	Se producen a partir de las interacciones entre los miembros de la cadena de suministro. Las principales causas de estos riesgos son una cooperación inadecuada entre los miembros y la falta de visibilidad.
Los riesgos externos, son ajenos a la cadena de suministro	Accidentes, clima extremo, legislación, grupos de presión, delincuencia, desastres naturales, guerras, etc.	Surgen de las interacciones con su entorno. Son de alta incertidumbre y sus causas son difíciles de determinar.

Fuente: adaptado de Waters (2011)



Por otro lado, Schlegel y Trent (2016) clasifican los riesgos en estratégicos, riesgos o peligros normales (aquellos para los cuales se contrata un seguro), riesgo financiero y riesgo operacional. Y los tipifican en cuatro pilares básicos:

- 1) Riesgo de suministro: este riesgo abarca áreas tales como la continuidad del proveedor, el abastecimiento estratégico, la viabilidad y capacidad del proveedor, el precio de las materias primas, las evaluaciones de los proveedores, la logística de entrada, el fraude, la corrupción y la falsificación. Los riesgos inherentes aquí son las interrupciones causadas por la incapacidad de los proveedores para entregar a tiempo, fallas de calidad, fallas financieras, fallas de cumplimiento, complejidad del canal y fallas de comunicación.
- 2) Riesgo de proceso: incluye sistemas de telecomunicaciones, fusiones y adquisiciones, estrategia de marketing, estructura organizacional, marcos y métricas, estrategia y ejecución de la cadena de suministro, fabricación y calidad, evaluación del riesgo organizacional, mapas de calor y salas de guerra. Aquí los riesgos inherentes incluyen interrupciones causadas por problemas de calidad, escasez de inventario, entregas tardías, falta de capacidad, fallas en los equipos, cortes de las telecomunicaciones, mala ejecución general y desalineación de la estrategia y las métricas.
- 3) Riesgo de demanda: abarca áreas como nuevos clientes, tendencias del mercado, interés/gasto del consumidor, gestión/previsión de la demanda, planificación de requisitos de distribución, integridad del producto, servicio al cliente y planificación de escenarios. Los riesgos inherentes aquí son las interrupciones causadas por problemas en la distribución, las acciones de los competidores, la reputación del producto, la gestión de marca, las redes sociales/tendencias, la logística y el sentimiento del cliente.
- 4) Riesgo ambiental: abarca áreas tales como regulaciones gubernamentales, impuestos, volatilidad económica, cambio de divisas, desastres naturales y cumplimiento. Los riesgos inherentes son los desastres naturales, los riesgos geopolíticos y energéticos, la seguridad portuaria, la seguridad de las instalaciones y la logística, las fluctuaciones del cambio de divisas, la economía global, la guerra, las pandemias y la desobediencia civil.

Los autores de SCRM han realizado grandes esfuerzos en identificar y caracterizar los factores que predisponen al incremento de los riesgos, entre los que se destacan: Waters (2011) y Schlegel y Trent, 2016:

- 1) Incremento de la globalización de mercados: sobre todo a través de tercerizaciones, que se extienden en las cadenas de suministro de extremo a extremo.
- 2) Aumento de los niveles de incertidumbre económica y la volatilidad del mercado, que crean una variabilidad adicional en la demanda y la oferta y hacen que sea más difícil lograr la planificación del suministro de la demanda.



- 3) Incompatibilidad operacional: cada organización ejecuta sus operaciones de la manera que mejor se adapte a sus propios fines.
- 4) Decisiones complejas: las cadenas de suministro son largas y complejas, y no es realista esperar que cada gerente de la cadena tome las decisiones correctas. Por lo tanto, es probable que ocurra algo inesperado en alguna parte, tal vez por un gerente que comete un error, y las consecuencias se propagan a través de la cadena.
- 5) Expansión de riesgo: Forrester (1961) describió el “efecto látigo”, donde el riesgo se amplifica a medida que se mueve a través de una cadena de suministro.
- 6) Inercia: en completo contraste con la agilidad está el concepto de inercia en una cadena de suministro, que es la renuencia por realizar cambios o adaptarse a cualquier tipo de condiciones nuevas.

Otros riesgos pueden estar asociados con esto, y el Servicio de Seguridad del Reino Unido (2006) -comúnmente denominado MI5- enumera las posibles consecuencias de un incidente terrorista importante como: pérdida de personal por muerte o lesiones; daño a los edificios; pérdida de sistemas de TI, registros, comunicaciones y otras instalaciones; la falta de disponibilidad del personal debido al transporte interrumpido o su falta de voluntad para viajar; efectos psicológicos adversos en el personal, incluido el estrés y la desmoralización; interrupción a las organizaciones y negocios relacionados que son necesarios para las operaciones; daño a la reputación; nuevas demandas de negocios puestas en la organización.

Estrategias de disminución de riesgos: recomendaciones de diseño y rediseño

a. Barreras a la ocurrencia y propagación de errores humanos

Existen varios métodos para construir barreras al error humano. Por ejemplo, sistemas interactivos con computadora pueden forzar al usuario a corregir una entrada no válida, proveer alarmas sobre acciones que puede inducir potencialmente a errores y emplear algoritmos de autocorrección que tratan de inferir las intenciones del usuario. Desafortunadamente, cada uno de estos métodos puede ser también infringido, dependiendo del contexto en el que se usa. Funciones forzadas pueden iniciar un proceso de retroceso y pueden causar una confusión total y mayores oportunidades de error (Reason 1990), y se pueden ignorar alertas en casos de sobre carga de trabajo.

Koppel et al. (2005) encontraron la facilitación de errores por el uso de sistemas computarizados interactivos en el uso de un sistema computarizado de un hospital, contradiciendo ampliamente que el sistema reduce significativamente los errores de prescripción de medicamentos. En este estudio los errores se agruparon en dos categorías: 1) errores de información resultantes de la fragmentación de la información y falla en la integración de la información a través de varios



sistemas de información de hospitales; 2) interfaces hombre-máquina que fallan en la adecuada consideración de las conductas de practicante en respuesta a las restricciones de la estructura de trabajo de la organización del hospital. Un ejemplo de la primera categoría es cuando un médico ordena nuevos medicamentos o modifica los existentes. Si las dosis actuales no se discontinúan, la medicación puede resultar incrementada o disminuida, o adicionada como duplicada o conflictiva. La detección de este error se ve por banderas en la interfaz que pueden requerir mirar 20 pantallas para un solo paciente. Los sistemas organizacionales complejos como los hospitales pueden hacer extremadamente difícil para los diseñadores anticipar los muchos contextos y asociar problemas que pueden resultar de interacciones con el sistema.

Los beneficios de reducir cierto tipo de error, es correr el riesgo de nuevos errores

Los seres humanos están adaptados para detectar y corregir los errores basados en habilidades que ellos mismos cometen y sirven como barreras. La autocorrección, sin embargo, implica dos condiciones: que el humano parta de procesos automáticos, y que el humano invierta recursos atencionales periódicamente para chequear si las intenciones se encuentran y las pistas están disponibles para alertar sobre las desviaciones de las intenciones (Reason 1990). Esto se aplica tanto a deslices (*slips*) u omisiones de acciones.

Factores contextuales como fatiga o distracción hacen no razonable esperar que el médico invierta los recursos atencionales necesarios para advertir estos tipos de errores. Más aun, las señales de advertencia “solución riesgosa” son una pobre solución a este problema, porque requieren que el humano mantenga el conocimiento en la cabeza (WM) haciendo esta información voluble a pérdidas de memoria resultante por demoras o distracciones entre encontrar la ampolla y preparar la solución. La solución más confiable es proveer pistas táctiles en los lugares de almacenaje y en las ampollas.

No sorprendentemente, las habilidades humanas para detectar errores se reducen considerablemente en el nivel de acciones basadas en conocimiento. En estas situaciones más complejas, la detección de errores depende de descubrir que un objetivo erróneo había sido seleccionado o reconocer que un movimiento en el espacio de problema no es consistente con el objetivo. En este sentido, es esperable que los errores estratégicos (p. ej. definición de objetivo) sean más difíciles de descubrir que los errores tácticos (p. ej. elegir que subsistema diagnosticar). La detección y recuperación de errores en el nivel de acciones basadas en conocimiento aumenta con la experiencia, aumentando los errores basados en habilidad (Amalberti, 2001).

Una barrera muy común es tener redundancia de personal para la detección de errores, pero requiere que la otra persona sea externa a la situación de operaciones. Woods (1984) detectó en 99 simulaciones de emergencia en plantas nucleares, que ninguno de los errores que involucraban diagnóstico del sistema fueron detectados por los operadores que los realizaban, sino por otras personas. En contraste, la mitad de los errores categorizados como deslices (*slips*) fueron

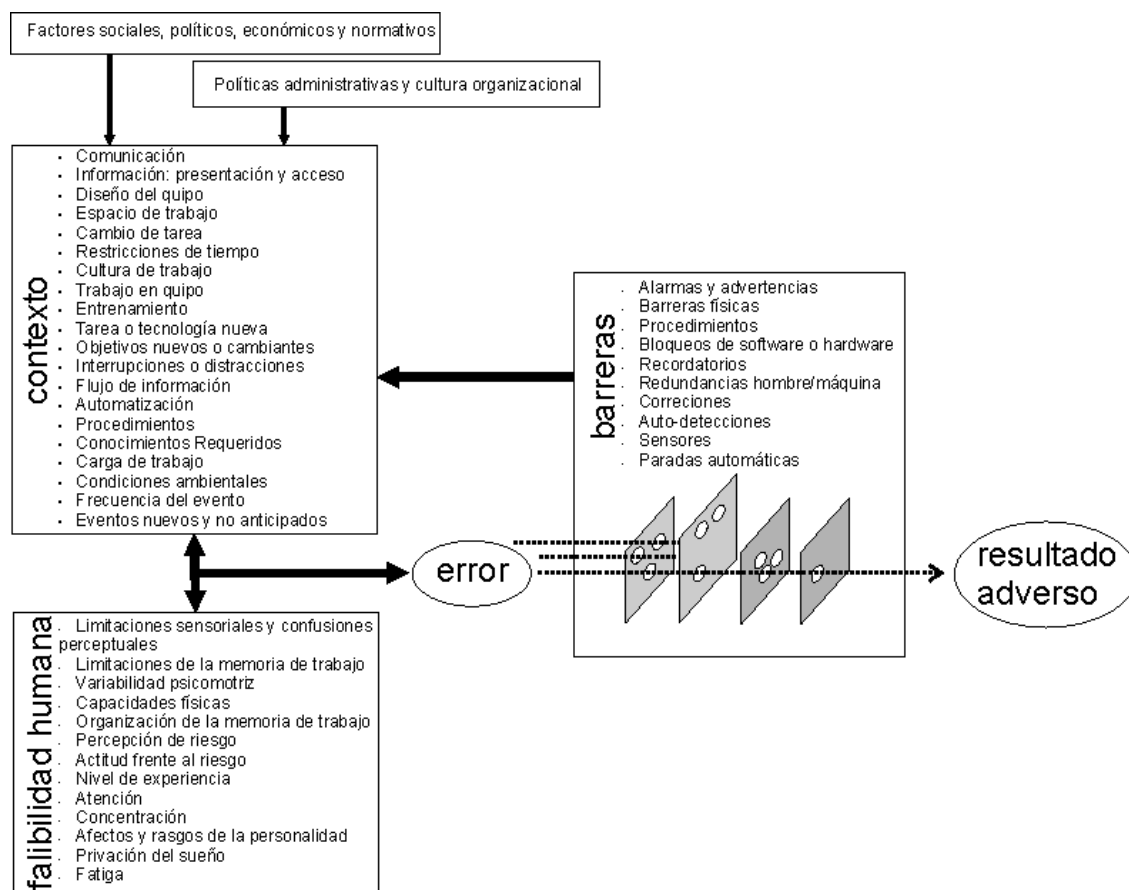


detectados por los operadores que los hacían. Estos resultados sugieren que los miembros de un equipo tienen la misma tendencia a producir errores actuando individualmente o en un equipo.

Las complejas interacciones que devienen en las circunstancias de una guardia de 24 horas (fatiga y sobrecarga de trabajo) proveen múltiples oportunidades de error humano, resultantes de información faltante o mal entendida, o confusión en los protocolos de tratamiento. Afortunadamente, existen múltiples redundancias en forma de materiales alternativos (p. ej. medicamentos y equipos), esquemas de tratamiento, y trabajadores de la salud que impiden la propagación de este tipo de errores (Cook, Render y Woods, 2000).

Finalmente, la presencia percibida de barreras como sistemas inteligentes y aparatos de corrección puede incrementar los comportamientos riesgosos por parte de las personas (Wilde, 1982). Esto asume que los humanos son buenos para estimar la magnitud del riesgo, lo cual no parece ser el caso.

Figura 4. Las barreras a los errores humanos



Fuente: adaptado de Shariit (Handbook of human factor and ergonomics, 2006)



b. Vulnerabilidad y resiliencia en las cadenas de suministros

La vulnerabilidad de un sistema de cadena de suministro puede manifestarse en sus infraestructuras tanto nodales como modales, sus procesos, así como en la operación y gestión de la cadena de suministro. La parte nodal de la infraestructura de la cadena de suministro son los nodos en la cadena de suministro, por ejemplo, puertos, terminales, almacenes y puntos de transbordo, control o puertas de seguridad, mientras que las partes modales de la cadena de suministro son los modos de transporte, por ejemplo, modos de transporte por aire o por agua, incluidas las vías navegables de aguas profundas, de aguas rápidas y de aguas interiores.

Existen estrategias tradicionales en la gestión de cadenas de suministros, que intentan absorber los riesgos y vulnerabilidades sin realizar un exhaustivo análisis de las mismas. Las estrategias más utilizadas (ver tabla 2) son el inventario de emergencia o stock de seguridad, pronósticos estadísticos, contratación de seguros, planes de capacitación a los operadores y penalidades al resto de los miembros de la cadena.

Tabla 2. Estrategias tradicionales de la cadena de suministro frente a diferentes riesgos

Estrategia	Riesgos cubiertos
Stock de seguridad	Demoras normales o excesivas de los plazos de entrega proveedores, interrupciones o problemas con los proveedores, errores de pronósticos de demanda, fallas en el sistema de planeamiento de producción.
Pronósticos estadísticos	Cambios estacionales, modificaciones en las conductas de los consumidores, información insuficiente, cambios en el ciclo de vida del producto.
Contratación de seguros	Problemas legales de los proveedores, mala calidad de insumos, fraudes, problemas de garantía, fallas de equipos, problemas de materiales, accidentes, problemas climáticos.
Capacitación	Problemas administrativos, errores humanos de los operadores, violaciones del sistema, problemas de calidad en la producción.
Penalidades	Problemas en las garantías de proveedores, fraudes, espionaje.

Fuente: adaptado de Schlegel y Trent (2016)

Los modelos y metodologías de análisis específicos para la cadena de suministro se encuentran en etapas de desarrollo y no han sido validados totalmente. En su lugar, los autores de SCRM prefieren importar las metodologías de análisis de riesgo genéricas (García, Grosskelwing, Arellano y Torrez, 2017) como el análisis de causas y modos de fallas, árboles de eventos, análisis de riesgos y operaciones (HAZOP), evaluación de riesgos cuantitativos (QRA), análisis de riesgos críticos y de errores (CREA), análisis de árboles de fallos (FTA), análisis de modo de falla y efectos (FMEA), distribución de probabilidad de fallas y fiabilidad (PDEA), redes petri, redes



bayesianas, enfoque markoviano, etc. Se han alcanzado excelentes resultados por la aplicación de metodología de análisis de riesgo. Schlegel y Trent (2016) realizan una excelente revisión de estos, entre los que es interesante destacar un estudio de la naturaleza, causas y complejidad de las interrupciones de la cadena de suministro, que identificó siete factores subyacentes que tienden a presentarse cada vez que las cadenas de suministro fallan: deslocalización, complejidad creciente, presiones de costos, agrupamiento geográfico, comunicaciones modernas, métodos modernos de producción y una creciente dependencia.

En general, y cada vez con mayor énfasis, los análisis de riesgos en cadenas de suministros tienden a generar recomendaciones en torno al diseño de una cadena de suministros “resiliente” (más del 80 % de las compañías están actualmente enfocadas en diseñar cadenas de suministros resilientes (Schlegel & Trent, 2016)). Entre estas recomendaciones se destacan:

- 1) Diseño y desarrollo de caminos paralelos (*parallel paths*) (Waters, 2011; Zsidisin y Ritchie, 2009): proveedores múltiples, multiplicidad de canales logísticos a consumidores, etc.
- 2) Diseño de cadenas de suministro más cortas.
- 3) Rediseño de “la forma de la cadena de suministro” (*shape of the supply chain*) (Waters, 2011): una cadena de suministros más compleja (mayor cantidad de eslabones y conexiones) tiene más riesgos que una más simple. La vulnerabilidad de una cadena de suministros no solo depende de la cantidad de miembros, sino también de la forma en que están conectados. Redes complejas de proveedores y proveedores de servicios de terceros, así como grandes interdependencias entre múltiples empresas, que aumentan la necesidad de coordinar los riesgos (Schlegel y Trent, 2016).
- 4) Inventarios más grandes.
- 5) Agilidad (Waters, 2011): diseño de operaciones lo suficientemente flexibles como para tratar de manera eficiente las condiciones rápidamente cambiantes.
- 6) Aumento de las capacidades operativas (Braithwaite y Hall, 1999): la flexibilidad y agilidad requerida por una cadena de suministros resiliente no es posible si los recursos están usados al límite.
- 7) Acortar los plazos de entrega y posponer las entregas hasta el último plazo posible.
- 8) Estandarización de operaciones y manufactura flexible.
- 9) Bajar el punto de desacoplamiento (*downstream decoupling point*) (Waters, 2011): la información del consumidor final penetra la cadena de suministros a proveedores cada vez más lejanos de este.
- 10) Colaboración y confianza entre los miembros de una cadena de suministros.

A pesar de las diferentes estrategias recomendadas por algunos autores, existe un cierto consenso en clasificar las estrategias de abordaje del riesgo en cuatro grandes grupos: evitar (eliminar),



reducir (prevención, eliminación de causas, reducción y mitigación de consecuencias), transferir (por contrato, seguros, transferencia física, riesgo compartido) y aceptar.

De la confiabilidad humana en centrales nucleares a la gestión de riesgos en la cadena de suministros

Como se habrá podido concluir de las secciones precedentes, la gestión de riesgos en la cadena de suministros y los análisis de confiabilidad humana, tienen enfoques distintos sobre el mismo accidente. La primera observa, principalmente, las conexiones del accidente con el resto de los eslabones de la cadena de suministro e intenta anticiparse a su incertidumbre de ocurrencia mediante distintas estrategias, principalmente el diseño resiliente.

Los análisis de confiabilidad humana, en cambio, se focalizan en las causas cognitivas y factores que predispusieron el error humano que desencadenó el accidente. Intenta principalmente realizar un cálculo probabilístico cuantificado, pero también intenta anticiparse a la tremenda incertidumbre de la ocurrencia de ese error humano, mediante distintas estrategias, principalmente la colocación de barreras.

Por otro lado, los objetivos a los que aspiran ambas disciplinas (SCRM y HRA) tienen también similitudes que deben ser exploradas con nuestro propósito de integrarlas. Desde la década del 90, los modelos de confiabilidad humana han cambiado su perspectiva a una visión holista del ser humano interactuando con su entorno, como se vio en el apartado 2. Más recientemente, estos cambios epistemológicos en la disciplina han llevado a los modelos a tomar un enfoque más sistémico: como es el caso del modelo FRAM.

En primer lugar, las estrategias de mitigación recomendadas en la gestión de riesgos en la cadena de suministros coinciden con el modelo de barreras (el omnipresente modelo del queso suizo) propuesto por Reason (1990). La estrategia de mitigación se fundamenta en la identificación de los factores de riesgo y la reducción de su frecuencia. Los factores de riesgo en la confiabilidad humana son los denominados factores de desempeños (del inglés: *performance shaping factors* - PSF) provenientes tanto del contexto como de la fiabilidad propia del ser humano (ver figura 4).

El error humano no ocurre en el vacío, está determinado en parte y largamente permitido por el contexto operacional (Dekker, Fields y Wright, 1997). El contexto da significado a la información que el operador recibe, guía la formulación y revisión de objetivos e intenciones, determina y limita el conocimiento y la atención para la exitosa solución de problemas. Desde los inicios del estudio de la confiabilidad humana se utilizaron factores de desempeño para cuantificar los factores contextuales (Kim y Jung, 2003).

En segundo lugar, los procedimientos de identificación y análisis de riesgos en las cadenas de suministros realizan una visión sistémica de esta, correspondiéndose a los últimos desarrollos y



perspectivas conceptuales de los análisis de confiabilidad humana, los cuales inicialmente mostraron un enfoque reduccionista para llegar luego a un enfoque sistémico, atravesando previamente por una etapa holista. Desde 1990 muchos autores de confiabilidad humana introdujeron en sus teorías conceptos holistas y sistémicos que catalizaron ese cambio de paradigma.

a. Modelado de los factores de riesgo de error humano en la cadena de suministro

Para el presente trabajo se seleccionó y adaptó un modelo de factores de desempeño desarrollado por Liu *et al.* (2016) y Liu *et al.* (2017), que consiste en los siguientes pasos: 1) obtención de la percepción de operadores (en este caso logísticos) de la frecuencia e impacto de los factores de desempeño; 2) cuantificación de las evaluaciones de riesgo; 3) clasificación de los factores de acuerdo a una matriz de riesgo.

Se realizó una encuesta exploratoria a 7 operadores logísticos con más de 10 años de experiencia, en la que cada operador asignó a 138 indicadores su frecuencia percibida: nunca, casi nunca, frecuentemente, casi siempre, siempre. Los 138 indicadores corresponden a 30 factores de desempeño vinculados a: 1) al operador (fatiga, experiencia, estrés, tendencias cognitivas); 2) al equipo de trabajo (requerimientos comunicacionales, disponibilidad de comunicación, calidad de comunicación, liderazgo, cohesión y coordinación); 3) a la organización (cultura de seguridad y administración de recursos); 4) a la interfaz entre el operador y el sistema (disponibilidad de la información, ambigüedad de la información, confiabilidad de la información, sobrecarga de información); 5) al sistema (confiabilidad del sistema, complejidad del sistema, dinámica del sistema); 6) al ambiente de trabajo (entorno y calidad del lugar de trabajo); 7) a los procedimientos (complejidad y calidad de los procedimientos); 8) a la tarea específicamente (complejidad de los objetivos, de la obtención de la información, del análisis de la información, de la toma de decisiones, de la implementación de las acciones y presión de tiempo). Los indicadores se cuantifican mediante la metodología propuesta por Liu *et al.* (2017). Los resultados de frecuencia percibida, impacto y riesgo de cada uno de los factores se resume en la tabla 3.

Tabla 3. Percepciones de frecuencia de riesgo (F), impacto (I) y riesgo (R) de los factores asociados al desempeño humano en operaciones logísticas de cadena de suministro

Factor	F	I	R	Calificación del factor
1. Operador				
1.1 Fatiga	2,83	5,3	15,0	Riesgo alto
1.2 Experiencia/habilidad/entrenamiento	2,78	5,8	16,1	Riesgo alto
1.3 Estrés	3,47	5,5	19,1	Riesgo especialmente alto
1.4 Responsabilidad	3,33	5,2	17,3	Riesgo especialmente alto
1.5 Tendencias naturales	2,86	4,2	12,0	Riesgo moderado



2. Equipo de trabajo				
2.1 Requerimientos de comunicación	4,21	4	16,9	Riesgo especialmente alto
2.2 Disponibilidad de comunicación	2,54	4,8	12,2	Riesgo moderado
2.3 Calidad de la comunicación	2,57	5	12,9	Riesgo moderado
2.4 Liderazgo	2,38	4,9	11,7	Riesgo moderado
2.5 Cohesión del equipo	2,14	4,8	10,3	Riesgo moderado
2.6 Colaboración en el equipo	2,51	4,9	12,3	Riesgo moderado
3. Organización				
3.1 Cultura de seguridad	3,11	5,2	16,2	Riesgo alto
3.2 Administración de recursos	2,93	5,1	14,9	Riesgo moderado
4. Interfaz del sistema				
4.1 Disponibilidad de la información	2,98	5,6	16,7	Riesgo especialmente alto
4.2 Ambigüedad de la información	2,88	4,5	13,0	Riesgo moderado
4.3 Confiabilidad de la información	2,71	4,8	13,0	Riesgo moderado
4.4 Sobrecarga de información	2,54	5,2	13,2	Riesgo moderado
5. Sistema				
5.1 Confiabilidad del sistema	2,71	5,6	15,2	Riesgo alto
5.2 Complejidad del sistema	2,79	4,6	12,8	Riesgo moderado
5.3 Dinámica del sistema	3,05	5,1	15,5	Riesgo alto
6. Ambiente de trabajo				
6.1 Entorno de trabajo	2,68	4,2	11,3	Riesgo moderado
6.2 Calidad del lugar de trabajo	2,62	4,5	11,8	Riesgo moderado
7. Procedimientos				
7.1 Complejidad de los procedimientos	3,24	4,4	14,2	Riesgo moderado
7.2 Calidad de los procedimientos	2,67	4,8	12,8	Riesgo moderado
8. Tarea				
8.1 Complejidad de los objetivos	3,71	4,6	17,1	Riesgo especialmente alto
8.2 Complejidad de obtención de la información	3,34	4,8	16,0	Riesgo alto
8.3 Complejidad del análisis de la información	2,91	6	17,5	Riesgo alto
8.4 Complejidad de la toma de decisiones	2,86	4,6	13,1	Riesgo moderado
8.5 Complejidad de la implementación de las acciones	3,31	4,6	15,2	Riesgo alto
8.6 Presión de tiempo	3,80	5,2	19,8	Riesgo especialmente alto

Fuente.: elaboración propia.

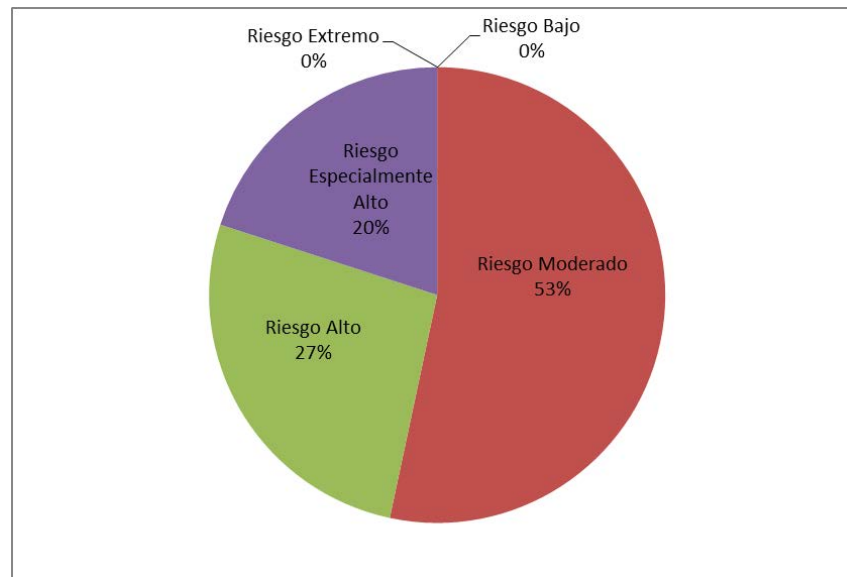
Como se puede observar, hay 5 factores de riesgo especialmente alto: estrés, responsabilidad, requerimientos de comunicación, disponibilidad de la información, complejidad de los objetivos



y presión de tiempo. La distribución de riesgo en los factores de desempeño en cadenas de suministro se muestra en la figura 5.

Si se compara con la distribución de factores correspondiente a operadores de salas de control en centrales nucleares referido en Liu et al. (2017), no existen en las cadenas de suministro factores de riesgo extremo como en las centrales nucleares.

Figura 5. Distribución de riesgo de los factores de desempeño humano en tareas de operadores logísticos en cadenas de suministro



Fuente: elaboración propia.

La falta de experiencia/entrenamiento/habilidad es una PSF interna importante para el error de la industria nuclear, de aviación y de transporte. La fatiga puede poner en peligro el rendimiento (p. ej. al reducir la memoria y la atención, aumentar los lapsos de memoria, reducir la aversión al riesgo y degradar la comunicación) y causar incidentes y accidentes en sistemas complejos. Varios accidentes nucleares provocados por el hombre, como Chernobyl, Three Mile Island, Davis-Besse (Ohio) y Rancho Seco (Sacramento), todos ocurrieron a primera hora de la mañana (cuando los operadores usualmente están fatigados) e implicaron un error humano al no lidiar con el mal funcionamiento técnico inesperado pero controlable. Los factores de experiencia/entrenamiento/habilidad y fatiga deben ser priorizados en las centrales nucleares. Sin embargo, en las cadenas de suministro aparecen más relevantes los factores de estrés y responsabilidad. El estrés en tareas logísticas es algo muy documentado: las exigencias crecientes de alta calidad de servicio y de muy alta competitividad en costes, en la cadena de suministro, junto con las características de las actividades llevadas a cabo, resultan propicias para generar distrés en los trabajadores, sobre todo cuando se dan determinadas condiciones de trabajo (CEL, 2013). Entre los factores que se asocian al estrés en tareas logísticas se encuentran (CEL, 2013):



excesiva carga de trabajo en horarios muy concretos, muchos trabajos que requieren una gran dosis de concentración, necesidad de llevarlos a cabo sin cometer errores (también asociado al otro factor de riesgo especialmente alto “responsabilidad”), jornadas muy largas o fuera de horarios normales, en periodos estacionales, condiciones de trabajo aislado o en solitario (conductores, pequeños almacenes con poco personal), requiere una constante toma de pequeñas decisiones en los diferentes niveles de responsabilidad.

Para el componente de equipo, tres factores relacionados con la comunicación tuvieron puntajes de riesgo percibidos relativamente altos en centrales nucleares (Liu *et al.*, 2017): requisito de comunicación, disponibilidad de comunicación y calidad de la comunicación. En las cadenas de suministros los requisitos de comunicación es el que sobresale entre los factores de riesgo del equipo de trabajo. Si los factores de PSF relacionados con la comunicación contribuyen a un mayor riesgo para los equipos, es razonable suponer que podrían conducir a más errores del equipo o que podrían ocurrir más errores de comunicación. De hecho, la primera recomendación prioritaria del Centro Español de Logística es la mejora de los mecanismos de comunicación entre los agentes involucrados (CEL, 2013).

Como se analizó en la sección b de la *Metodología*, la cultura de seguridad en las cadenas de suministros es una meta pendiente. Las decisiones en este sector se toman fundamentalmente teniendo en cuenta la eficiencia aumentando significativamente los riesgos asociados. Así lo demuestra también el factor asociado. Esto no ocurre en las centrales nucleares, donde la seguridad es un aspecto en extremo contemplado.

La disponibilidad de la información aparece con un factor de riesgo especialmente alto en las cadenas de suministro, no siendo así en las centrales nucleares donde la disponibilidad de información es de vital importancia para el funcionamiento y seguridad de esta. La información necesaria para la toma de decisiones en logística es de muy variada índole, no solo es necesario una lectura del estado del sistema (como en el caso de las salas de control de las centrales nucleares), es comprensible que aparezca como un factor de alto riesgo. Es un interesante punto para mejorar los sistemas logísticos, no evidenciado en los análisis hasta ahora realizados (ver sección b de *Estrategias de disminución de riesgos: recomendaciones de diseño y rediseño*). La complejidad de los procedimientos no muestra valores altos de riesgo en las tareas logísticas, a la inversa que en las salas de control de centrales nucleares.

Coinciden los factores de riesgo en cuanto a la presión de tiempo, tanto en tareas logísticas como en centrales nucleares. Siendo justamente el factor de mayor importancia en las cadenas de suministros. Notablemente, las tareas logísticas tienen como variable fundamental el tiempo y la consecuente presión que perciben sus operadores. No se trata solo del mantenimiento del flujo de materiales a lo largo de la cadena de suministros, sino que estos materiales lleguen en el momento en que son requeridos. Las estrategias de manufactura moderna (como el justo a tiempo), enfatizan este factor.



Por último, aparece la complejidad de los objetivos como un factor especialmente alto en las operaciones logísticas. En efecto, muchos objetivos conjugan decisiones multifactoriales que los hacen incluso paradójicos, como se comentó en la sección b de la *Metodología*.

b. Análisis sistémico de riesgos en la cadena de suministros

Los ambientes industriales modernos tienen operaciones colaborativas e interactivas; incluso responsabilidades, sobre la seguridad y la administración, fragmentadas y compartidas. Esto requiere una perspectiva sistémica de las características técnicas, humanas y organizacionales del sistema. Los modelos de confiabilidad humana basados en la teoría de sistemas serían capaces de capturar la causalidad y complejidad subyacente de los accidentes de los sistemas sociotécnicos modernos desde una amplia visión sistémica.

Los “errores humanos” surgen de diseños inadecuados del sistema, tales como complejidades de la tarea o situaciones proclives a errores (Szwarcman, Domech, Vellasco, Pacheco y Ribeiro, 2009). Los errores son probables de ocurrir cuando los requerimientos de la tarea exceden las limitaciones humanas. El término “error humano” debería, entonces, reemplazarse por “interacción fallida” para capturar las contribuciones conjuntas del humano y de la máquina (Dekker, Fields y Wright, 1997). Los errores son el resultado de situaciones y actividades propensas a error más que a personas propensas a errores, luego la probabilidad de error estará fuertemente asociada a las condiciones del entorno (Fujita y Hollnagel, 2004).

El concepto de sistema sociotécnico refleja la visión integradora de un conjunto de elementos que tienen características humanas, técnicas y económicas (Tonț, Vlădăreanu, Munteanu y Tonț, 2009). El enfoque sistémico enfatiza las interdependencias y enlaces (físicos o informativos) entre sus componentes y con otros sistemas. Tiene las siguientes ventajas principales (Tonț, Vlădăreanu, Munteanu y Tonț, 2009): 1) es un medio del enfoque global de los aspectos económicos, sociales, ambientales y técnicos que revela la intercondicionalidad y el ajuste de los procesos; 2) a través de modelos matemáticos, resalta la relación cualitativa y cuantitativa entre los componentes de las entidades económicas, lo que permite encontrar soluciones operacionales eficientes para problemas complejos; 3) permite un equilibrio óptimo entre los componentes en términos de información permanente a las variables exógenas de una entidad económica (mercado, competencia, tecnología, recursos, sistemas legales y políticos).

El sistema puede abordarse como cualquier sección de la realidad en la que se identifica un conjunto de fenómenos, objetos, procesos, conceptos finitos o grupos interconectados a través de un conjunto de relaciones recíprocas y actos ordenados en común para lograr objetivos bien definidos, incumplidos a través de un plan. Un ingrediente clave del enfoque de pensamiento sistémico es integrar enfoques de reduccionismo y holismo para comprender el problema o sistema dado (Ham, Park y Jung, 2012).



Complejidad: probablemente el concepto más importante para abordar el comportamiento del sistema sociotécnico moderno es la “complejidad” (Le Coze, 2006; Silberstein y McGeever, 1999) para una revisión conceptual). Los sistemas complejos poseen propiedades emergentes, son autoorganizados, tienen múltiples agentes, contienen múltiples bucles de retroalimentación y poseen cualidades de adaptación (Gertman, 2012). La complejidad también está asociada con infraestructuras de hardware y software a gran escala, alta densidad de interdependencias entre procesos y actividades, interacción humano-máquina, comportamiento organizacional, control de supervisión de recursos automatizados, ciclo de retroalimentación de aprendizaje y la adaptabilidad, robustez y resistencia del sistema (Abraha y Liyanage, 2014; Gertman, 2012). La complejidad es un comportamiento dinámico al borde de la estabilidad y el caos (Silberstein & McGeever, 1999). Las nuevas tecnologías han cambiado el rol de los operadores humanos del control manual al monitoreo y dirección de la automatización, desde funciones humanas más simples utilizadas con equipos procesados, a empresas cognitivas mucho más complejas, desde el control humano hasta la supervisión y control cognitivo de sistemas cada vez más complejos.

Como se indicó en la sección anterior, muchos modelos HRA evalúan la complejidad del sistema como un PSF, entendiéndolo como un contribuyente al error humano. Sin embargo, la complejidad cuantificada por un PSF no aborda las interacciones, adaptaciones, coordinación, sincronización y otras características de los sistemas complejos.

Ingeniería de sistemas cognitivos: es imposible discutir la seguridad de los sistemas sociotécnicos sin describir el trabajo de Erik Hollnagel. Comenzó en los años 70 a estudiar el procesamiento de información humana, y luego, en la década de los 80, publicó varios artículos sobre el error y la confiabilidad humana. En ese momento, introdujo en coautoría con David Woods el campo de investigación interdisciplinaria de la ingeniería de sistemas cognitivos: “la ingeniería cognitiva trata del comportamiento humano en mundos complejos” (Hollnagel y Woods, 1983). CREAM (Hollnagel, 1998) fue posiblemente el modelo que genera el cambio generacional en los estudios de confiabilidad humana.

Hollnagel ha sugerido recientemente un importante cambio de paradigma en la ciencia de la seguridad: de la seguridad-I a la seguridad-II (Hollnagel, Safety-I and safety-II: the past and future of safety management, 2014). Afirma que el análisis de seguridad tradicional, centrado en las causas de lo que sale mal en lugar de las causas de lo que va bien, ya no es adecuado: “los sistemas sociotécnicos no son descomponibles, bimodales o predecibles” (Hollnagel, 2014). Este cambio de paradigma se basa en constructos conceptuales: resonancia (Hollnagel y Goteman, 2004; Hollnagel, 2012), emergencia (Goldstein, 1999) y resiliencia (Hollnagel, Woods y Leveson, 2007).

Resonancia: importado de la física, el concepto de resonancia se centra en la variabilidad del rendimiento normal debido a ajustes aproximados: “la variabilidad del rendimiento puede verse como una señal modulada débil” (Hollnagel y Goteman, 2004). Una idea interesante del método



desarrollado a partir del concepto de resonancia FRAM (Hollnagel, 2012) es considerar el componente del sistema como entidades funcionales. Las entidades se caracterizan por seis relaciones (entradas, salidas, recursos, controles, precondiciones y tiempo); estas relaciones reflejan la interacción de componentes no lineales de los sistemas complejos. En FRAM, las evidencias del enfoque sistémico son explícitas: “la visión sistémica enfatiza cómo las funciones dependen unas de otras y cómo pueden aparecer inesperadamente acoplamientos inesperados” (Hollnagel, 2012).

Emergente: una emergencia o propiedad emergente es un concepto importante en el enfoque sistémico. Hollnagel y muchos otros autores de HRA adoptaron el concepto “resultante” de la “emergencia” para captar la complejidad, las características y las propiedades de los sistemas sociotécnicos. Esta propiedad emergente tiene una fuerte conexión con la resonancia y la resiliencia: “FRAM se centra en cómo pueden surgir las condiciones que conducen a los accidentes” (Hollnagel, 2012), “la resiliencia organizacional es una propiedad emergente de organizaciones complejas” (Pariès, 2007). La resiliencia es una construcción conceptual que ha generado extensos programas de investigación en ciencia de la seguridad (“ingeniería resiliente”) (Hollnagel, Woods y Leveson, 2007), así como en otras disciplinas. Ver Bhamra, Dani y Burnard (2011) para la revisión del concepto de resiliencia y aplicaciones.

Mohaghegh, Kasemi y Mosleh (2009) describen tres procesos emergentes en sistemas sociotécnicos: “homogeneidad” (los individuos se sienten atraídos por organizaciones que tienen atributos similares a sus propias características y puntos de vista), “interacción social” (intercambio social entre los miembros del mismo grupo) y “liderazgo”. Otro comportamiento emergente es la “falacia de defensa en profundidad” (Le Coze, 2013) que enfatiza las interdependencias entre los actores y los efectos de las violaciones de las barreras.

Los accidentes se pueden entender, desde esta perspectiva, como fenómenos emergentes que surgen debido a interacciones de los componentes de un sistema complejo y no lineal.

El análisis sistémico basado en los conceptos de resonancia y emergencia está fuertemente ligado al *fenómeno de la transmisión y la amplificación de las interrupciones en las cadenas de suministro*. Este concepto de transmisión y amplificación de interrupciones en las cadenas de suministro aún no ha sido objeto de una intensa investigación, ya sea en marcos teóricos o empíricos (Swierczek, 2018).

La transmisión de los efectos negativos que se originan en los factores de riesgo requiere que al menos dos compañías en una cadena de suministro participen en un proceso. Una empresa se ve afectada por un impacto directo de estos factores de riesgo, mientras que la otra se ve afectada por una influencia indirecta. Los factores de riesgo afectan directamente a un proveedor, causando una cierta interrupción, que luego se transmite a otros participantes dentro de la estructura de la cadena de suministro. En este caso, el proveedor es el enlace inicial, mientras



que los actores en los otros niveles del flujo físico de productos en la cadena de suministro - productor y cliente- están expuestos a un impacto indirecto de estos factores de riesgo. En consecuencia, un impacto indirecto de los factores de riesgo constituye la transmisión de interrupciones.

Los efectos negativos del riesgo pueden extenderse a un mayor número de participantes en una cadena de suministro. Siguiendo la opinión de Svensson (2000), el rango puede variar, pero generalmente se encuentra dentro de dos tipos de interrupciones ubicadas en las posiciones extremas del continuo: rango limitado de interrupciones, generalmente bilateral; interrupciones generalizadas, generalmente holísticas. La transmisión directa denota que las interrupciones causadas por los factores de riesgo en el enlace inicial se transfieren luego a los otros niveles posteriores de una cadena de suministro. La transmisión hacia atrás se origina cuando las interrupciones en el último eslabón de una cadena de suministro se transfieren aguas arriba a los escalones iniciales. De acuerdo con Jüttner et al. (2003), la intensidad de las interrupciones puede ser absorbida o amplificada durante la transmisión. En general, la amplificación de las interrupciones significa que cada enlace afectado en una cadena de suministro puede estar expuesto a efectos más fuertes de los riesgos.

Por último, Radhakrishnan, Harris y Kamarthi (2018) describen y analizan una serie de conceptos que, desde esta perspectiva, permiten modelar la cadena de suministro como un sistema sociotecnológico, siendo su seguridad una propiedad emergente íntimamente relacionada con el alcance de estos conceptos:

- 1) *Flexibilidad de la cadena de suministro*: “poder doblar fácilmente sin romperse”. La flexibilidad asegura que los cambios causados por el evento de riesgo puedan ser absorbidos por la cadena de suministro a través de respuestas efectivas.
- 2) *Velocidad de la cadena de suministro*: en comparación con la flexibilidad, la velocidad pone más énfasis en la eficiencia que en la eficacia de la respuesta y recuperación de la cadena de suministro a lo largo y después de una interrupción. Velocidad de movimiento, acción u operación, rapidez y rapidez.
- 3) *Visibilidad de la cadena de suministro*: la identidad, ubicación y estado de las entidades que transitan por la cadena de suministro, capturadas en mensajes oportunos sobre eventos, junto con las fechas/horas planificadas y reales de estos eventos. La visibilidad de la cadena de suministro aborda la información sobre entidades y eventos relacionados con pedidos de extremo a extremo, inventario, transporte y distribución, así como cualquier evento en el entorno. La visibilidad encadena y previene reacciones exageradas, intervenciones innecesarias y decisiones ineficaces en una situación de evento de riesgo, se relaciona con una respuesta de interrupción efectiva y recuperación. Además, la capacidad de ver desde un extremo de la tubería hasta la otra es un elemento importante



- de preparación para el evento porque las señales correctas se recogen de manera oportuna. Visibilidad, velocidad y flexibilidad juntas a veces se capturan bajo “agilidad”.
- 4) *Colaboración de la cadena de suministro*: la colaboración se relaciona con la visibilidad en el sentido de que incluye la disposición de las partes para compartir incluso los riesgos sensibles y la información relacionada con eventos de riesgo. Como tal, la colaboración contribuye a reducir la incertidumbre y la preparación del evento. Además, se ha sugerido la colaboración como el pegamento que mantiene unidas a las organizaciones de la cadena de suministro en una crisis. Impide el comportamiento oportunista en nombre de las partes individuales que afectaría adversamente la capacidad de respuesta de todo el sistema.
 - 5) *Capacidad de cadena de suministro*: el flujo máximo diseñado a través de una instalación durante un periodo de tiempo. Siguiendo la tendencia de esta definición, varios autores han analizado el impacto de la capacidad de la cadena de suministro en el rendimiento general de dicha cadena.
 - 6) *Adaptabilidad de la cadena de suministro*: la adaptabilidad de la oferta se refiere a la capacidad de una cadena de suministro para aumentar y reorganizarse frente a posibles interrupciones.

Conclusiones

La investigación reviste de una importancia significativa, al presentar un avance hacia la integración de dos subdisciplinas hasta ahora no exploradas: los análisis de confiabilidad humana y la gestión de riesgos en la cadena de suministros. Surge así una nueva área de estudio: la gestión de la confiabilidad humana en la cadena de suministros, no existiendo antecedentes de esta en la literatura actual.

El desarrollo de este trabajo permite evidenciar la falta de aplicación de las técnicas de confiabilidad humana en el área de la logística. En esta área, los estudios de factores humanos se restringen a meras menciones entre los factores operativos de las cadenas de suministro. Los modelos de confiabilidad humana demuestran ser válidos en este campo, abordando la problemática del riesgo desde nuevos enfoques y dando nuevas respuestas a las acciones de mitigación de fallas.

Desde el punto de vista de la investigación científica, es importante destacar la producción de conocimiento en torno a los factores humanos preponderantes en la cadena de suministro, lo que permite orientar decisiones en torno al aumento de eficiencia, disponibilidad y resiliencia de estos sistemas sociotecnológicos. Adicionalmente, se realiza una breve revisión bibliográfica de ambos campos de estudio, permitiendo identificar nuevas áreas de vacancia de investigación científica.



La determinación de factores humanos críticos en las actividades logísticas también permite orientar la formación de futuros profesionales desde el paradigma de las competencias.

Finalmente, desde la gestión de riesgos de la cadena de suministro se pretende contribuir a la validación y consolidación de esta subdisciplina de cada vez más vital importancia en la seguridad y desarrollo de nuestros países.

En síntesis, la investigación permitió demostrar la importancia y aplicabilidad de las metodologías de confiabilidad humana a los procesos logísticos y a la cadena de suministro generando una serie de estrategias para el diseño de sistemas tolerantes, resilientes y menos vulnerables a la ocurrencia y propagación de errores humanos.

Referencias

- Abraha, H. H., & Liyanage, J. P. (2014). Managing Modern Sociotechnical Systems: New Perspectives on Human-Organization-Technological Integration in Complex and Dynamic Environments. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 1109-1123.
- Amalberti, R. (2001). The paradoxes of almost totally safe transportation systems. *Safety Science*, 109-126.
- Baziuk, P., Rivera, S., & Nuñez, J. (2014). Towards Human Factor Taxonomy with Cognitive Generic Terms. *Lectures Notes in Engineering and Computer Science*, 1141-1146.
- Bhamra, R., Dani, S., & Burnard, K. (2011). Resilience: The concept, a literature review and future directions. *International Journal of Production Research*, 49(18), 5375-5393.
- Boring, R., & Blackman, H. (2007). The origins of the SPAR-H method's performance shaping factor multipliers. *Official Proceedings of the Joint 8th IEEE Conference on Human Factors*, (pp. 177-184).
- Brindley, C. (2017). *Supply chain risk*. Taylor & Francis.
- CEL. (2013). *Guía el estrés laboral en el sector transporte y operadores logísticos*. Madrid: Centro Español de Logística.
- Cook, R. I., Render, M., & Woods, D. D. (2000). Gaps in the continuity of care progress on patients safety. *British Medical Journal*, 791-794.
- Dekker, S., Fields, B., & Wright, P. (1997). Human error recontextualised. *Proceedings of a Workshop on Human Error and Systems Development*. Glasgow.



- Di Pasquale, V., Iannone, R., Miranda, S., & Riemma, S. (2013). An Overview of Human Reliability Analysis Techniques in Manufacturing Operations. *Operations Management* (chapter 9). ISBN 978-953-51-1013-2.
- Dougherty, E. M. (1990). Human reliability analysis - Where shouldst thou turn? *Reliability Engineering and System Safety*, 29(3), 283-299.
- Fujita, Y., & Hollnagel, E. (2004). Failures without errors: quantification of context in HRA. *Reliability Engineering and System Safety*, 145-151.
- García, A., Grosskelwing, G., Arellano, A., & Torrez, E. (2017). Gestión de riesgos en las cadenas de suministro: exploración bibliográfica. *Congreso Interdisciplinario de Ingenierías* (pp. 106-116). Veracruz, México: Instituto Tecnológico Superior de Misantla.
- Gertman, D. I. (2012). Complexity: application to human performance modeling and HRA for dynamic environments. *5th International Symposium on Resilient Control Systems (ISRCS)* (pp. 19-24). IEEE.
- Goldstein, J. (1999). Emergence as a construct: History and issues. *Emergence*, 1(1), 49-72.
- Hagen, E. (1976). Human Reliability Analysis. *Nuclear Safety*, 315-326.
- Ham, D.H., Park, J., & Jung, W. (2012). Model-based identification and use of task complexity factors of human integrated systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 100, 33-47.
- Hollnagel, E. (1998). *Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)*. Oxford: Elsevier.
- Hollnagel, E. (2012). *FRAM, the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Hollnagel, E. (2014). *Safety-I and safety-II: The past and future of safety management*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Hollnagel, E., & Goteman, O. (2004). The functional resonance accident model. *Proceedings of cognitive system engineering in process plant*, 155-161.
- Hollnagel, E., & Woods, D. D. (1983). Cognitive Systems Engineering: New wine in new bottles. *Man-Machines Studies*, 583-600.
- Hollnagel, E., Woods, D. D., & Leveson, N. (2007). *Resilience engineering: Concepts and precepts*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Khojasteh-Ghamari, Z., & Irohara, T. (2018). Supply Chain Risk Management: A Comprehensive Review. *Supply Chain Risk Management* (pp. 3-22). Singapore: Springer.



- Kim, B., & Bishu, R. (2006). Uncertainty of human error and fuzzy approach to human reliability analysis. *International Journal of Uncertainty, fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 14, 111-129.
- Kim, I. S. (2001). Human reliability analysis in the man-machine interface design review. *Annals of Nuclear Energy*, 1069-1081.
- Kim, J. W., & Jung, W. (2003). A taxonomy of performance influencing factors for human reliability analysis of emergency tasks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 479-495.
- Kirwan, B. (1998). Human error identification techniques for risk assessment of high risk systems. Part 1: Review and evaluation of techniques. *Applied ergonomics* , 157-177.
- Koppel, R., Metlay, J. P., Cohen, A., Abaluck, B., Localio, A. R., Kimmel, S., & Strom, B. L. (2005). Role of computerized physician order entry systems in facilitating medical errors. *Journal of the American Medical Association*, 1197-1203.
- Le Coze, J. C. (2006). Safety and security in the light of complexity. Uncertainty & qualification of systems analysis. *International Symposium on systems & human science. Complex systems approaches for safety security and reliability*. Luxembourg.
- Le Coze, J. C. (2013). New models for new times. An anti-dualist move. *Safety science*, 59, 200-218.
- Lee, S. W., Kim, A. R., Ha, J. S., & Seong, P. H. (2011). Development of a qualitative evaluation framework for performance shaping factors (PSFs) in advanced MCR HRA. *Annals of Nuclear Energy*, 1751-1759.
- Liu, P., Lv, X., Li, Z., Qiu, Y., Hu, J., & He, J. (2016). Conceptualizing performance shaping factors in main control rooms of nuclear power plants: a preliminary study. *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (pp. 322-333). Cham: Springer.
- Liu, P., Qiu, Y., He, J., Tong, J., Zhao, J., & Zhizhong, J. (2017). Identifying Key Performance Shaping Factors in Digital Main Control Rooms of Nuclear. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 264-275.
- Marsden, P., & Hollnagel, E. (1996). Human interaction with technology: The accidental user. *Acta Psychologica*, 345-358.
- Meister, D. (1989). The nature of human error. *Global Telecommunications Conference and Exhibition Communications Technology for the 1990s and Beyond Globecom '89* (pp. 783-786). IEEE.



- Mohaghegh, Z., Kazemi, R., & Mosleh, A. (2009). Incorporating organizational factors into Probabilistic Risk Assessment (PRA) of complex socio-technical systems: A hybrid technique formalization. *Reliability Engineering and System Safety*, *94*, 1000-1018.
- Mosleh, A. H., & Chang, Y. (2004). Model-based human reliability analysis: prospects and requirements. *Reliability Engineering and System Safety*, *83*, 241-253.
- Mosleh, A., & Chang, Y. H. (2007). Cognitive modelling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents - Part 1. *Reliability Engineering and System Safety*, 997-1013.
- Munger, S., Smith, R., & Payne, D. (1962). *An index of electronic equipment operability, data store, AIR-C43-1/62-RP*. Pittsburgh: America Institute for Research.
- Pariès, J. (2007). Complexity, emergence, resilience. *Resilience engineering: Concepts and precepts* (pp. 43-55). Ashgate Publishing, Ltd.
- Radhakrishnan, S., Harris, B., & Kamarthi, S. (2018). Supply Chain Resiliency: A Review. *Supply Chain Risk Management* (pp. 215-235). Singapore: Springer.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, knowledge, signals, signs, symbols, and other distinctions in human performance models. *Transactions on Systems, Man, and Cyber-netics*, 257-266.
- Reason, J. (1990). *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schlegel, G. L., & Trent, R. J. (2016). *Supply chain risk management: An emerging discipline*. Crc Press.
- Silberstein, M., & McGeever, J. (1999). The search for ontological emergence. *The Philosophical Quarterly*, *49*(195), 201-214.
- Sträter, O., Dang, V., Kaufer, B., & Daniels, A. (2004). On the way to assess errors of commission. *Reliability Engineering and System Safety*, 129-138.
- Swierczek, A. (2018). Supply Chain Risk Management in the Transmission and Amplification of Disruptions. *Supply Chain Risk Management* (pp. 155-178). Singapore: Springer.
- Szcwarcman, M. D., Domech, J. T., Vellasco, M. M., Pacheco, M. A., & Ribeiro, N. (2009). A fuzzy system por the assessment of human reliability. *IFSA/EUSFLAT*, (pp. 1102-1107).
- Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk managemen. *International Journal of Production Economics*, *103*(2), 451-488.



Tonț, G., Vlădăreanu, L., Munteanu, R. A., & Tonț, D. G. (2009). Some aspects regarding human error assessment in resilient socio-technical systems. *nd International Conference on Visualization, Imaging and Simulation (VIS'09)*. Baltimore, Morgan State University, USA.

Waters, D. (2011). *Supply chain risk management: vulnerability and resilience in logistics*. Kogan Page Publishers.

Wiegmann, D. A., & Shappell, S. A. (1997). Human Factors Analysis of Postaccident Data: applying theoretical taxonomies of human error. *The International Journal of Aviation Psychology*, 67-81.

Wilde, G. J. (1982). The theory of risk homeostasis: implications for safety and health. *Risk Analysis*, 209-225.

Woods, D. D. (1984). Some Results on Operator Performance in Emergency Events. *Institute of Chemical Engineers Symposium Series*, 21-31.

Zsidisin, G. A., & Ritchie, B. (2009). *Supply chain risk management—developments, issues and challenges*. Boston: Springer.



Logística portuaria y el camino a los puertos 4.0



Lorena Bearzotti⁶

Resumen

Últimamente, mucho se ha hablado de los nuevos desafíos en torno a la logística, el comercio internacional y, por ende, de la actividad portuaria considerando esta ola de cambios que se están produciendo y que se ven englobados bajo el nombre de Industria 4.0.

Esta nueva realidad de cambios vertiginosos naturalmente afecta a los procesos en la logística portuaria y en dentro de las terminales propiamente dicho. La irrupción de nuevas tecnologías y de la forma en que las personas se relacionan con ellas han obligado a las organizaciones a repensar sus procesos a la luz de estos nuevos requerimientos.

En este trabajo se aborda como los puertos y los actores de su comunidad han iniciado ese camino de transición hacia el logro de lo que se ha denominado Puerto 4.0, porque la cuarta revolución ha llegado y los puertos no pueden quedar fuera.

Palabras claves: 4IR, puerto 4.0, logística 4.0, cadena de suministro 4.0

Introducción

En la actualidad se está viviendo el inicio de una nueva revolución industrial llamada Industria 4.0, caracterizada por tener un impacto directo en la forma de operar y tomar las decisiones en las organizaciones, afectando también no solo a las cadenas de suministro sino también a su gestión.

Frente a una cadena de suministro globalizada, entra en escena una parte fundamental de ésta, la cadena logística portuaria centralizada en un actor clave dada de su relevancia y el impacto que tiene en forma simultánea de múltiples cadenas de suministro: el puerto. De esta manera los cambios que se producen en el contexto de la cadena de suministro y sus elementos consecuentemente también afecta al puerto y los prestadores de servicios que forman parte de su cadena logística, así comienzan a surgir conceptos como puerto 4.0 o también conocidos como Smart ports y logística 4.0. Así, se puede observar que bajo la denominación 4.0 se engloban todas aquellas iniciativas que promueven la incorporación de las tecnologías con el

⁶ Doctor en Ingeniería (2012). Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Santa Fe, Argentina. Profesor Jerarquizado Escuela de Transporte de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (2018-actualidad), Part-time para el Departamento de Informática (2013-actualidad). Universidad Técnica Federico Santa María.



correspondiente rediseño de los procesos, con el fin de comenzar a dar respuestas a nuevas y viejas preguntas asociadas con la sustentabilidad, la globalización y la resiliencia, desde los elementos individuales a la integración de los mismos en la cadena logística portuaria y en la cadena de suministro global. Hoy se busca un crecimiento y desarrollo que sea sustentable y competitivo, integrando la automatización y la digitalización cambiando los procesos y reconociendo las diferentes realidades de los actores involucrados y usuarios de estos sistemas. Además, los puertos deben comenzar a dar respuestas a los nuevos clientes y sus nuevas demandas, integrando la comunidad.

Cómo se ha mencionado, la 4IR se basa en la innovación tecnológica caracterizada por el IoT (*Internet of Things*), *Big Data*, *Business Analytics*, drones, producción flexible, impresión 3D entre otras, donde el desafío se encuentra en cómo estas tecnologías son incorporadas en las organizaciones cuando incluso falta mano de obra capacitada.

Industria 4.0 es una realidad que rápidamente va tomando espacios, marcando ventajas competitivas y estratégicas entre quienes la adoptan, donde la pregunta no es si hay o no que adoptar estas innovaciones sino cómo y cuándo hacerlo. Esto es particularmente cierto en el contexto de la actividad portuaria y sus diferentes actores. Esta revolución marca la diferencia entre los puertos líderes que producen innovación en sus equipos y procesos, y el resto de los puertos que van perdiendo competitividad sin poder responder a los requerimientos de un mercado cada vez más empoderado y con voz.

En este artículo se abordan los desafíos asociados la generación de este concepto de puerto 4.0, como una evolución de los puertos actuales en los que las ideas de la 4IR son adoptadas en post de una mejora en sus procesos con el impacto consecuente en los niveles de servicios de sus diferentes procesos. La cuarta revolución industrial se encuentra reconfigurando el escenario global, y los puertos no son la excepción.

En la próxima sección se presentan los fundamentos y contextualiza la 4IR con la finalidad de fundamentar los conceptos básicos que se han ido desarrollando entorno a esta disruptiva idea. Por otra parte, en la sección 3 se procede a describir los elementos fundamentales detrás del concepto de Smart Port o Puerto 4.0. Esta nueva generación de puertos se sustenta en una revolución también de la logística y el transporte para ser 4.0. Por último, las conclusiones y futuros trabajos son presentados en la sección 4.

La cuarta revolución industrial

En los últimos años las organizaciones se han visto enfrentadas a cambios significativos producidos fundamentalmente en el área de las tecnologías de la información y las comunicaciones, así como en cambios en cuanto a los vínculos con los otros actores de sus cadenas de suministro, pensando en sus proveedores y sus clientes (Addo-Tenkorang & Helo, 2016). Estos cambios han impactado en los procesos productivos, en la gestión de las organizaciones en la interacción con los proveedores y clientes, donde los avances tecnológicos



y en especial de los sistemas de información han permitido obtener una mayor visibilidad de los procesos, mejorando la generación de información para los procesos de toma de decisión (Pfohl et al, 2016). Además, las organizaciones deben hacer frente al empoderamiento de los clientes finales, con su creciente demanda de satisfacer sus necesidades de forma inmediata. Estos cambios se han tornado cada vez más rápido en comparación a como se producían en épocas anteriores. Todos estos cambios y cómo el uso de las tecnologías han impactado en el funcionamiento de las organizaciones y su forma de relacionarse se conoce desde hace unos años como Industria 4.0 o la llamada Cuarta Revolución Industrial (Oesterreich & Teuteberg, 2016).

Esta nueva revolución industrial difiere en las precedentes en que la clave está en el uso de la información y de las tecnologías de automatización, sin embargo, la Cuarta Revolución Industrial es producto de un proceso evolutivo, que se ha acelerado en las últimas décadas (Preuveneers & Illie-Zudor, 2017).

La primera revolución industrial, o Industria 1.0, tiene su origen en la segunda mitad del siglo XVIII concluyendo entre 1820 y 1840. Esta primera revolución industrial ocurrió de la mano de la invención de la máquina de vapor, un salto tecnológico significativo para la época. La segunda revolución industrial, Industria 2.0, comenzó en torno a 1850 durando hasta el inicio de la Primera Guerra Mundial, en esta segunda revolución industrial el foco estuvo en un cambio del paradigma de los procesos productivos con la aparición de las líneas de ensamble de la mano con la aparición de los motores de combustión. Terminada la Segunda Guerra Mundial la Tercera Revolución comienza a iniciar su proceso de cambio. La Industria 3.0 es conocida como la revolución científico-técnica, donde se caracteriza por la introducción de la automatización en los procesos productivos, comenzando tener en las tecnologías de la información un elemento clave para mejorar el desempeño y la integración. Sin embargo, la velocidad en la innovación y en la generación de nueva tecnología ha reducido los ciclos de cambio y desde el 2010 se está viviendo la transición a la nueva Revolución Industrial, la cuarta, denominada Industria 4.0 (Industry 4.0 o Industrie 4.0 si consideramos las fuentes alemanas, debido a que ellos fueron los primeros en acuñar el término de la nueva revolución en el contexto de la industria) (Yongxin et al, 2017).

Por Industria 4.0 se entiende al conjunto de ideas y conceptos relacionados con el uso de la innovación tecnológica, donde la organización es vista como un sistema complejo donde se integran elementos de diferente naturaleza (Personas, Tareas, Estructuras y Tecnologías), donde el éxito depende de cómo estos elementos se relacionan entre sí. Así la Industria 4.0 es el conjunto de herramientas que permite la mejora en la gestión de las organizaciones poniendo al cliente en el centro de los procesos de decisión para satisfacer de una mejor manera los requerimientos y los cambios que se puedan producir tanto internos como externos. En consecuencia, el siguiente paso es comprender cómo esta nueva revolución afecta a las cadenas de suministro, pensando fundamentalmente en la integración y coordinación de los actores (Zhang et al, 2014), (Schuh et al, 2014) (Li et al, 2017).



Desde la aparición del concepto entorno al año 2010 hasta la actualidad, la cuarta revolución industrial ha crecido y evidenciado la realidad de este nuevo cambio de paradigma en los sistemas productivos y por ende en su forma de gestión, muchos de estos cambios son producidos por necesidades internas y por la irrupción de las nuevas tecnologías, pero también es una respuesta a los cambios externos fundamentalmente al empoderamiento de los clientes finales y su creciente necesidad de satisfacer sus demandas casi de forma inmediata (Hofmann & Rüscher, 2014) (Lima-Monteiro et al, 2017). Este cambio de foco de conocimiento y de satisfacción del cliente ha provocado la necesidad de adaptación en la búsqueda de las respuestas para lo cual las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones se han convertido en elementos estratégicos para lograr ventajas competitivas (Erol et al, 2016) (Hermann et al, 2016).

La cuarta revolución industrial también se ha tomado el mundo académico, como lo evidencia la explosión de trabajos en el área. De esta manera es posible evidenciar que es un área de trabajo promisorio y en crecimiento, planteando nuevos desafíos en diversos ámbitos que requieren de la colaboración industria – universidad para su resolución.

La Industria 4.0 se basa en conceptos como: IoT, Cloud, Interconexión de sistemas inteligentes, Big Data, Fabricación Flexible (y lo más cerca posible del cliente final), geolocalización, robots, impresión 3D, drones y Cyber-physical systems entre otros conceptos y tecnologías, tendientes a lograr la visión de una “Smart Factory”. La idea detrás de este amplio abanico que es denominado Industria 4.0 es lograr una integración de los procesos de las organizaciones a partir de sus elementos contando con sensores que pueden brindar información en tiempo real y a partir de ésta llevar a cabo de procesos de auto-regulación, autonomía e interconexión entre ellos (Jayaram, 2016) (O’Donovan et al, 2015).

En los primeros años del surgimiento de este concepto el foco estuvo en cómo las organizaciones iban a adaptarse e incorporar esta nueva revolución, que no es una opción sino una necesidad creciente para mantenerse operativa y competitiva, siendo incluso hoy pensada como una herramienta estratégica (Lee et al, 2014). Sin embargo ahora el desafío es trasladar esta revolución al exterior de las fronteras de las organizaciones y comenzar a aplicar los elementos claves de la Industria 4.0 en el contexto de la cadena de suministro y en consecuencia en su gestión, donde el principal problema a abordar es la generación de este concepto de red autónoma pero de forma distribuida donde las diferentes organizaciones que la componen deben coordinarse e integrarse entre sí sin perder la autonomía dando soporte al proceso global de la entrega de bienes y servicios a los clientes finales, cada día más volátiles y exigentes (Premm & Kim, 2015).

La Industria 4.0 es un hecho, presentando el desafío de cómo gestionar hoy el creciente volumen de datos y cómo éstos sirven de base para nuevos procesos de decisión o nuevos requerimientos de los clientes. Sin embargo, hay varios aspectos que necesitan ser analizados y que aún son frentes abiertos para la adopción de esta nueva revolución. Uno de éstos es lo innovador de muchas de estas tecnologías, con lo en consecuencia no posibilita por ejemplo la escalabilidad global, o la existencia de algunos vacíos legales, o fallos en la seguridad. También se pueden



plantear problemas relacionados con las necesidades de inversión que impliquen una reingeniería de los procesos actuales y la necesidad de una mano de obra que aún no está completamente capacidad debido a lo novedoso de alguna de estas tecnologías y de la necesidad de contar con capacidad de trabajo en equipos multidisciplinarios e interdisciplinarios. La complejidad de los problemas no permite una sola visión del mismo, y de la misma manera no es posible desarrollar una solución con una única mirada, la integración entre las diferentes disciplinas es una necesidad creciente a la hora de entrar en los requerimientos de esta nueva revolución industrial.

La cuarta revolución industrial ha comenzado a desarrollarse y las organizaciones de este tiempo les toca el desafío de ser las protagonistas del cambio, conociendo los riesgos a los cuales se exponen por ser actores de esta transición. Sin embargo, la no adaptación a estos cambios es una condena a pérdida de competitividad.

En este escenario de cambio, los puertos y la comunidad del sistema portuaria denominada como cadena logística portuaria no puede permanecer como espectador del mismo, sino como actor de cambio liderando los procesos. Los puertos 4.0 o *Smart Port*, son una respuesta a estos cambios, una evolución a las necesidades cambiantes de los diferentes involucrados, donde la 4IR es la generadora de ese cambio y donde es posible encontrar la respuesta. En la próxima sección se presentan las ideas esenciales sobre lo que es un Puerto 4.0.

Puertos 4.0

Los puertos en sus diferentes tipos y especializaciones son un eslabón clave para las operaciones comerciales de un país, al ser un punto en el cual confluyen las diferentes cadenas de suministro, de importación y de exportación. Dado el fenómeno de globalización y los cambios que se viven no solo desde las tecnologías sino también desde la visión de los riesgos que afectan a las cadenas de suministro, los puertos se ven expuestos a demandas de mejoramiento para poder ofrecer una competitividad internacional, y no solo eso sino también responder a los cambios de visión y paradigmas. Hoy no se habla de UN puerto sino de una comunidad portuaria, es decir se ha pasado de una visión fragmentada a una estructura orgánica compleja integrando los actores que colaboran y comparten recursos para lograr sus objetivos.

En este escenario, existe una demanda creciente por el desarrollo de los llamados Smart Ports o Puertos 4.0, donde la base tecnológica y la digitalización sienta los cimientos de estos puertos que buscan incrementar la eficacia y volver predictivas las cadenas de suministro reduciendo la incertidumbre en los procesos que la sustentan, teniendo un efecto directo en los costos produciendo una reducción de los mismos y el uso de la infraestructura actual sin tener que recurrir al desarrollo de nuevas infraestructuras.

De esta manera se entiende por un Smart Port o Puerto 4.0 a aquel puerto que emplea los elementos del a 4IR en la realización de sus procesos respondiendo a los requerimientos de cambios en los modelos energéticos, uso de las tecnologías y cambios en los posibles parámetros de la logística ya el sistema de transporte. (Botti et al, 2017; Heilig et al, 2017; Kupriyanovsky et



al, 1978). Donde estos cambios tecnológicos traen consigo un cambio también en la gobernanza del Sistema portuario como una manera de competir y ser más eficientes.

Los nuevos puertos que responden a este paradigma son el producto de un largo proceso evolutivos de los puertos a lo largo de la historia, especialmente en el último siglo en el que se han dado grandes cambios desde diferentes perspectivas buscando una mejora de los procesos y de los servicios brindados.

Hoy los puertos están focalizados en un incremento en la eficiencia y eficacia de sus procesos para de esta manera impactar de manera positiva en los niveles de servicios comprometidos a los diferentes actores actuando de manera colaborativa para el logro del estado de bienes en conjunto de todos los involucrados. Para el logro de estas metas es necesario la incorporación de tecnologías como un elemento clave que sustenta y alimenta los diferentes procesos desde el nivel operativo, pasando por el táctico hasta llegar al estratégico. Así, esta idea de puerto del futuro comienza a gestarse y a operar, donde la tecnología transforma el transporte y en particular al puerto y su comunidad brindando interconexión, el uso de los datos en los diferentes procesos sustentando las decisiones, los medios electrónicos como una realidad junto esto con los sistemas automatizados que reducen los niveles de errores y favorecer esta idea de crear la idea de comunidad.

Los puertos han pasado por diferentes generaciones en su evolución a los Smart Ports, en la primera generación (hasta 1960) el foco del desarrollo portuario se centró en la generación y mejora de los procesos de carga y descarga. La siguiente generación (hasta 1980) marcó la transición hacia la industrialización de los puertos, donde las terminales comenzaron a ser vistas como un elemento que agrega valor a las operaciones y no solo como una estación de transferencia entre los distintos modos de transporte involucrados. Hasta el año 2000 los puertos pasaron a ser concebidos como puertos logísticos en donde la comunidad portuaria comenzó a tomar relevancia. A partir del 2000 a la fecha se está frente a la cuarta generación de puertos denominados *Smart Ports*, en esta generación la información pasa a ser un elemento de valor y fundamental para las operaciones a realizar no solo en el puerto sino en la cadena logística portuaria. En la actual generación la digitalización, la automatización y el uso de las tecnologías de la información y comunicaciones pasan a ser elementos comunes para el logro de un puerto inteligente. Sin embargo y sintonía con lo logrado en la tercera generación de puertos, hoy no alcanza con tener la coordinación dentro de la cadena logística portuaria para dar soporte a las funcionalidades y requerimientos de los diversos actores e interesados involucrados, hoy además se les exige a los puertos para incrementar su competitividad que puedan trabajar de manera colaborativa o en una cocompetición (competencia cooperativa), generando así una red de puertos con sus correspondientes cadenas logísticas portuarias. Esta red se traduce en una mayor visibilidad y trazabilidad de las cadenas logísticas globales, reduciendo la incertidumbre e incrementando la calidad en los procesos de análisis que sustentan los procesos de decisión tanto a nivel local como a nivel global, sin embargo para lograr este nivel de coordinación es necesario desarrollar tecnologías y utilizarlas en los procesos, los datos están, las tecnologías están ya



disponibles solo falta el salto hacia el desarrollo de sistemas de información para hacer uso de los mismos.

Esta transición de los puertos de la tercera a la cuarta generación viene de la mano de la cuarta revolución industrial que da sustento a los requerimientos de la gestión de la información y en la concepción de la información como elemento de valor y de integración inter-puertos y entre los actores de la cadena logística portuaria. En este proceso, algunos de los aspectos a ser abordados hacen referencia a la vinculación con el entorno, así la sustentabilidad pasa a ser uno de los pilares de esta nueva generación de puertos considerando sus pilares fundamentales: medioambiental, económico y social. En cuanto a la sustentabilidad social se contemplan los aspectos dentro de la misma organización, pero también la vinculación de este puerto con su entorno, especialmente si se está hablando de ciudades puertos.

Por otra parte, frente a las diferentes fuentes que generan inestabilidad en los procesos, hay una mayor demanda a que los puertos sean resilientes, es decir tengan la capacidad de operar o volver a estar operativos frente a los riesgos a los que están expuestos. El logro de la resiliencia de sus procesos pasa por un repensar los procesos internos y de coordinación con los otros actores para prevenir, contener y mitigar los efectos de estos riesgos cuando se convierten en una realidad. Una vez más la tecnología pasa a ser un actor clave en estos requerimientos.

Hoy es posible encontrar puertos que pueden ser considerados de puertos 4.0, entre ellos se pueden nombrar el puerto de Hamburgo y de Rotterdam, en ellos esta transición se está llevando incorporando tecnologías en sus procesos llegando a tener terminales automatizadas y mejorando la vinculación con la ciudad, así como el impacto medioambiental con la incorporación de energías limpias y medidas tendientes a reducir el impacto de la operación en el entorno. Por otro lado, en Latinoamérica y el Caribe hay distintos tipos de iniciativas tendientes a llevar los puertos de la región al siguiente paso de su evolución, dentro de éstas se puede mencionar por ejemplo la Red de puertos digitales, en la que se busca potenciar el uso de las tecnologías para la generación de una red colaborativa basada en el uso eficaz de la información.

Dentro de los desafíos que los puertos deben enfrentar se puede mencionar la resistencia natural al cambio, la irrupción de nuevas tecnologías conlleva generalmente un rediseño de los procesos y la especificación en consecuencias de nuevos requerimientos en los puestos laborales. En ese sentido incluso se está enfrente a la situación que éstos requerimientos no están siendo satisfechos por las instituciones de nivel superior, lo que representa una posible amenaza para el logro de este objetivo. Por otro lado, esta nueva generación de puertos requiere de inversión en infraestructura, pero no solo pensando en el área portuaria en sí, sino en el sistema logístico completo. Esto significa contar a nivel de los Estados de planificación estratégica y de coordinación entre ellos, dado que los hinterlands de estos puertos muchas veces no se limitan a un único país, como es el caso del puerto de Valparaíso y San Antonio en Chile que el área de influencia abarca zonas de Argentina, Brasil y Paraguay. Si la infraestructura logística falla o no es la adecuada para el movimiento de carga y pasajeros que generan estos puertos el sistema



completo puede fallar, más allá de las inversiones en las propias terminales. No se puede hablar de puertos 4.0 sin pensar en logística 4.0.

Conclusiones

Una nueva revolución industrial está surgiendo, la cuarta revolución industrial también conocida como 4IR no solo se evidencia en los cambios tecnológicos sino en los cambios que se están produciendo en los procesos productivos y logísticos, así como en la sociedad en su conjunto. Este fenómeno no es ajeno a los puertos y su comunidad logística, afectando los procesos, la necesidad de colaborar en la comunidad y de coordinarse con otros puertos creando una red colaborativa que les permite hacer frente a los requerimientos de los diferentes actores involucrados en su quehacer.

En este escenario los puertos y su cadena logística tienen la necesidad de evolucionar para poder adaptarse y responder de manera eficiente a estos cambios que son tanto internos como externos. Esta transición se está produciendo desde hace años, con la incorporación de estas tecnologías y herramientas pertenecientes a la 4IR en la operación de los puertos, sin embargo es necesario que éstos den el siguiente salto para ser parte de esta nueva revolución industrial con el fin de garantizar su sustentabilidad y en consecuencia su futuro.

En la visión de 4IR la organización es concebida como un sistema complejo donde se integran elementos de diferente naturaleza; un puerto puede ser pensando como un sistema complejo integrando personal, tareas, estructura y tecnologías. Así en los puertos y su comunidad logística se han comenzado a utilizar conceptos como IoT (Internet of Thing), Cloud Computing, interconexión de objetos inteligentes, Big Data, Fabricación Flexible, geolocalización, robots, drones, etc. Pueden que estos conceptos parezcan de un futuro lejano, pero hoy ya se encuentran en los puertos, cambiando la forma de operación y de gestión, mejorando los procesos y en consecuencia los niveles de servicios, es un futuro que ya se encuentra en el presente. Es un futuro que ha llegado y es para quedarse, impactando no solo los procesos sino como se llevan a cabo las relaciones entre los diferentes elementos de esta cadena. Actualmente hay una mayor cantidad de datos disponibles, datos que están esperando ser analizados y utilizados para evaluar decisiones pasadas y sustentar decisiones futuras. Los datos están, las tecnologías para su procesamiento están y ya hay varios casos de éxito en el contexto marítimo portuario que ya están incorporando estos elementos de la nueva ola de la revolución industrial. Hoy los puertos deben hacer frente a estos cambios, a los desafíos que ellos conllevan, desde decisiones de inversión en infraestructura, en hardware y software hasta la generación de nuevos puestos laborales donde hoy todavía no existe la mano de obra capacitada técnicamente para poder operar con esta nueva realidad, la reconversión es necesaria y ahí el rol de la universidad como generadora de este conocimiento y como formadora de esta nueva generación de profesionales es clave.

Una nueva revolución industrial está cambiando el quehacer a nivel global y toca hacer esa transición. El cambio llegó y la profundización irá creciendo en el tiempo, por lo que solo queda



adaptarse a esta nueva realidad, y los puertos con sus comunidades no son la excepción, es incorporarse a estos cambios o quedar obsoletos y deficientes en la competitividad.

Referencias

- Addo-Tenkorang R. & Helo, P. Big Data applications in operations/supply chain management: a Literature Review. In: Computers & Industrial Engineering. Vol 101, November 2016, pp 528-543.
- Botti, A., Monda, A., Pellicano, M., & Torre, C. (2017). The Re-Conceptualization of the Port Supply Chain as a Smart Port Service System: The Case of the Port of Salerno. *Systems*, 5(2), 35.
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K. and Sihm W. Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. In: *Procedia CIRP* 54 (2016) 13-18.
- Heilig, L., Schwarze, S., & Voß, S. (2017). An analysis of digital transformation in the history and future of modern ports.
- Hermann, M., Pentek, T. & Otto B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: *System Sciences (HICSS) 2016*, 49th Hawaii International Conference on.
- Hofmann, E. & Rüsçh, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. In: *Computers in Industry* 89(2017) 23-34.
- Jarayam, A. Lean Six Sigma approach for global supply chain management using Industry 4.0 and IIoT. In: *Contemporary Computing and Informatics (IC 31)*, 2016 2nd International Conference on. (Lee et al., 2014) Lee, J., Hung-An, K. & Shanhu, Y. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and Big Data environment. In: *Procedia CIRP* 16, pp. 3-8.
- Kupriyanovsky, Y., Kupriyanovsky, V., Klimov, A., Namiot, D., Dolbnev, A., Sinyagov, S., ... & Larin, O. (2018). Smart container, smart port, BIM, Internet Things and blockchain in the digital system of world trade. *International Journal of Open Information Technologies*, 6(3), 49-94.
- Li Q., Jiang H., Tang Q., Chen Y. & Zhou J. (2017). Smart Manufacturing Standardization: Reference Model and Standards Frameworks. In: Ciuciu I. et al. (eds). *On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2016 Workshops*. OTM 2016. Lecture Notes in Computer Sciences, vol 10034. Springer, Cham.



- Lima-Monteiro P., Parreira-Rocha M., Rocha A.D, Barata Olivera J. (2017). Big Data Analysis to Ease Interconnectivity in Industry 4.0 – A Smart Factory Perspective. In: Barangiu T., Trentesaux D., Thomas A., Leitao P., Oliveira J. (eds). Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Studies in Computational Intelligence. Vol 694. Springer, Cham.
- O'Donovan, P., Leahy, K., Bruton, K. & O'Sullivan, D. (2015). Big Data in manufacturing: a systematic mapping study. In: Journal of Big Data 2: 20.
- Oesterreich T. & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitalization and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. In: Computers in Industry 83 (2016) pp, 121-139.
- Pfohl HC., Yahsi B., Kurnaz T. (2017) Concept and Diffusion-Factors of Industry 4.0 in the Supply Chain. In: Freitag M., Kotzab H., Pannek J. (eds) Dynamics in Logistics. Lecture Notes in Logistics. Springer, Cham.
- Premm, M. & Kirn, S. A Multi-Agent System Perspective on Industry 4.0 Supply Networks. In: Müller J., Ketter W., Kaminka G., Wagner G. & Bulling N (eds). Multi-agent System Technologies. Lecture Notes in Computer Science, vol. 9433. Springer, Cham.
- Preuveneers, D. & Illie-Zudor, E. (2017). The intelligent industry of the future: A Survey on emerging trends, research challenges and opportunities in Industry 4.0. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, vol. 9, nro 3, pp. 287-298.
- Schuh, G., Potente, T., Wesch C., Weber, A., Prob J. Collaboration Mechanism to increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. In: Procedia CIRP 19 (2014) – 51-56.
- Yongxin L., Deschamps, F., de Freitas Rocha E. & Pierin Ramos L.F. (2017). Past, Present and Future of Industry 4.0 – a systematic literatura review and research agenda proposal. In: International Journal of Production Research, 55: 12, 3609-3639.
- Zhang, Z., Li, X., Wang, X. & Cheng, H. (2017) Decentralized Cyber-Physical Systems: A Paradigm for Cloud-Based Smart Factory of Industry 4.0. In: Cybersecurity for Industry 4.0. Part of the series Springer Series in Advanced Manufacturing pp. 127-171.



VIII Congreso Universidad Militar Nueva Granada
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA APLICADA**



III Congreso Escuela de Postgrados FAC
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA AERONÁUTICA**



CAPÍTULO II. PONENCIAS NACIONALES



Aeropuerto verde. Concepción y estrategias de gestión



Oscar Díaz Olariaga⁷

Resumen

Los aeropuertos tienen un doble impacto en las ciudades, por un lado, son motores de crecimiento y desarrollo, ya que generan empleo y riqueza, pero por otro lado impactan negativamente su entorno ambiental, tanto humano como físico. Por ello, la transformación al nuevo concepto de "aeropuerto verde" implica trabajar en todos aquellos aspectos de política pública, de planificación, y sobre todo de gestión, que minimicen o anulen las afecciones de los aeropuertos a las ciudades que sirven. Entonces, en el presente artículo primero se definen conceptos y se expone una filosofía de actuación para alcanzar el objetivo de aeropuerto verde. Paso seguido se identifican los procesos aeroportuarios que son fuentes de contaminación, y luego se citan cuales son los impactos ambientales generados por dichas fuentes contaminantes. Y finalmente se presentan las estrategias de mitigación que el gestor / operador aeroportuario debe diseñar, implementar y gestionar para cumplir el objetivo de alcanzar el estatus de aeropuerto verde.

Palabras clave: aeropuerto; transporte aéreo; gestión ambiental de aeropuertos; procesos aeroportuarios; sostenibilidad

Introducción

El "aeropuerto verde" es aquel que ha sido diseñado y es operado y administrado de tal manera que su impacto ambiental es el mínimo posible haciendo su gestión de carácter "sostenible". Basándose tanto en nuevas tecnologías como en estrategias y metodologías, pretende asegurarse de que todos los recursos se utilizan y gestionan de la manera más eficiente posible para generar el menor impacto medioambiental y el mejor servicio a todos los grupos de interés (ICAO, 2016; Ferrulli, 2016; Janic, 2011; ACRP, 2008).

Como se verá a continuación, el concepto de aeropuerto verde no implica un rediseño importante del aeropuerto, sino más bien un conjunto de acciones para mejorar el desempeño ambiental de las operaciones aeroportuarias, el acceso terrestre al aeropuerto y la infraestructura

⁷ De nacionalidad argentina y española. Ingeniero Aeronáutico por la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina); Doctor Ingeniero Aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid (España); y Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales por la UNED (España). Asesor de alto nivel de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) en materia de aeropuertos y transporte aéreo. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: oscar Diaz Olariaga@usantotomas.edu.co



del aeropuerto, en este sentido, un aeropuerto verde es el primer paso hacia un aeropuerto sostenible.

Desarrollo conceptual de aeropuerto verde. Metodología

El desarrollo metodológico comprende, en primer lugar, los procesos existentes en un aeropuerto para establecer una referencia para el desarrollo de un aeropuerto verde. En segundo lugar, se identifican las operaciones actuales del aeropuerto que generan un impacto en el medio ambiente y las medidas de mitigación adoptadas por los aeropuertos hoy en día. En tercer lugar, se describen los desafíos claves para conseguir un rendimiento medioambiental del aeropuerto tal que conduzcan a la generación de "cero" efectos ambientales.

Procesos en el aeropuerto

Operaciones de despegue y aterrizaje

El ciclo estándar de despegue y aterrizaje comienza cuando el avión cruza la llamada zona de mezcla, en su aproximación al aeropuerto, pasando luego por su descenso, aterrizaje (en pista), y carreteo (por calles de rodadura) hasta llegar y detenerse en su puesto de estacionamiento en plataforma. El ciclo se completa en el proceso de despegue, realizando la salida de plataforma, carreteo hasta la cabecera de pista y despegue (de Neufville y Odoni, 2013).

Operaciones de aeronaves en área de maniobras

La optimización de las operaciones en esta etapa es importante debido que los motores de las aeronaves tienen una baja eficiencia en las operaciones en tierra. Por lo general, cuando la aeronave debe abandonar la plataforma (para dar inicio a la operación de despegue) la misma es remolcada por unos vehículos especiales ("tractor de remolque") desde la misma plataforma hasta un punto en el área de maniobra en el cual la aeronave ya puede impulsarse por sí misma (de Neufville y Odoni, 2013; Janic, 2011).

Operaciones en plataforma

Una vez la aeronave se detiene en su puesto de estacionamiento en plataforma se inicia un conjunto de actividades (de servicios) en relación a la misma que se conoce con el nombre de "asistencia de aeronave en plataforma". Dichas actividades son (de Neufville y Odoni, 2013): a) guiado de atraque; b) embarque y desembarque de pasajeros y tripulaciones; c) carga y descarga de equipajes y mercancías; d) repostado de combustible; e) provisión de energía eléctrica; f) vaciado y limpieza de aguas residuales; g) vaciado y reposición de agua potable; h) limpieza de cabina y reposición de elementos de mayordomía; i) limpieza de cabina y reposición de elementos de catering; j) climatización de cabina; k) arranque de motores; l) remolcado del avión; m) deshielo.

Mantenimiento de aeronaves

En grandes aeropuertos existen ciertas instalaciones que se utilizan para proporcionar servicios de mantenimiento y reparación de aeronaves. Estas instalaciones suelen ser focos de generación



de contaminación ambiental, sobre todo generación de residuos (industriales) y contaminación acústica.

Gestión de residuos y del agua

En un aeropuerto tipo las actividades que generan contaminación ambiental son (OACI, 2002): a) abastecimiento de combustible, mantenimiento y lavado de vehículos, equipos y aviones; b) limpieza de los baños de las aeronaves; c) mantenimiento de pistas, edificios y terrenos; d) almacenamiento y manipulación de desechos; e) operaciones de deshielo (de aeronaves); f) gestión de residuos/basura (en general). Y en otro orden, cada aeropuerto adopta diferentes opciones para gestionar las aguas residuales y pluviales.

Operaciones de deshielo y anti-hielo de aeronaves

Los procedimientos de deshielo/anti-hielo sirven para tres propósitos: a) eliminación de hielo (humedad congelada o semi-congelada) en las superficies críticas de una aeronave antes del vuelo; b) protección de las superficies contra el congelamiento de agua o humedades; y c) eliminación de cualquier humedad congelada o semi-congelada en el entorno exterior de los motores. Varios de los productos de deshielo y anti-hielo disponibles en la actualidad no son tóxicos, pero pueden causar daños graves al medio ambiente.

Impactos ambientales y gestiones asociados con las operaciones del aeropuerto

Esta sub sección se centra en los problemas ambientales relacionados con el aeropuerto y algunas operaciones de las aeronaves. Se identifican los principales problemas ambientales y las condiciones ambientales en el propio aeropuerto y sus alrededores. Para cada concepto ambiental se hace una breve descripción incluyendo la descripción de las medidas típicas de compensación y mitigación para minimizar sus efectos.

Ruido Desde la introducción de los aviones a reacción, el ruido ha sido considerado como el problema ambiental y social más importante asociado a la aviación civil. La legislación de muchos países obliga a los aeropuertos (en particular los grandes y medianos) a generar mapas de ruido y elaborar planes de acción encaminados a mitigar sus efectos. El ruido producido por las aeronaves no solo se limita a los sobrevuelos en operaciones de despegue o aterrizaje, sino también a operaciones en tierra, como así también al generado por otros equipos, vehículos e instalaciones de servicios. Con el fin de disminuir las emisiones sonoras de las principales fuentes los aeropuertos vienen implementando gradualmente los criterios del “enfoque equilibrado” promovido por la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO, 2013, 2008).

El enfoque equilibrado comprende cuatro elementos principales (ICAO, 2013, 2008): 1) la reducción de ruido en la fuente; 2) procedimientos operacionales para la atenuación del ruido; 3) la gestión / planificación de uso del suelo; y 4) la introducción de restricciones operativas.

El aeropuerto no tiene capacidad para reducir el ruido en la fuente, los aviones, responsabilidad exclusiva de los fabricantes de aeronaves, igualmente con la planificación de uso del suelo,



competencia exclusiva de las autoridades locales / municipales. Sin embargo, tiene toda la capacidad de poner en práctica procedimientos operacionales (optimizando las trayectorias de aproximación y despegue), o restringir a las operaciones (de despegue / aterrizaje en ciertas pistas y en ciertos periodos del día o noche) (OACI, 2008).

Calidad del aire en la vecindad del aeropuerto

La calidad del aire en la proximidad del aeropuerto se ve afectada por los siguientes factores: a) emisiones de los motores de aeronave; b) emisiones de los vehículos y equipos (de servicios) del aeropuerto y del tráfico de acceso al aeropuerto; y c) emisiones de otras instalaciones existentes en el aeropuerto.

El aeropuerto puede mejorar la calidad del aire local por la aplicación de diferentes tipos de medidas, por ejemplo: a) mejor planificación de las operaciones de despegue y aterrizaje; b) utilizar vehículos de servicios (en tierra) impulsados por energía renovables; c) incentivar o negociar con las autoridades locales el uso de transporte público, que conecta la ciudad con el aeropuerto, que utilice energías renovables; etc. (OACI, 2008, 2002, 1999).

Emisiones de gases de efecto invernadero

La planta de energía del aeropuerto, la flota de vehículos (de servicios), el mantenimiento de la infraestructura aeroportuaria, los equipos de apoyo en tierra, equipos de energía de emergencia, los sistemas de eliminación de residuos, etc., son fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero.

El *Airport Carbon Accreditation* (ACC, 2017) evalúa y reconoce los esfuerzos de los aeropuertos para gestionar y reducir sus emisiones de carbono con cuatro niveles de certificación: "mapeo" (medida de la huella de carbono), "reducción" (gestión de la reducción de la huella de carbono), "optimización" (participación de terceros en la reducción de la huella de carbono) y "neutralidad" (neutralidad del carbono para las emisiones directas por compensación).

En otro orden, los edificios del aeropuerto se diseñan (o re-diseñan) para ser "inteligentes" y eficientes en energía según estándares como el LEED (2017) o el BREEAM (2017).

Uso de recursos

Los aeropuertos consumen cantidades significativas de agua en la prestación de servicios básicos a pasajeros, empleados, visitantes, y también otras instalaciones, equipos e infraestructuras. Hoy en día, el agua ya no se ve como un recurso ilimitado y aumenta el costo de suministro de la misma, por lo que los aeropuertos están gestionando el consumo de agua para reducir sus costos y también en su estrategia de desarrollo sostenible del mismo (Janic, 2011).

En cuanto a la gestión de recurso, hay dos enfoques fundamentales para la gestión del agua potable y su conservación: a) reducir su uso, y b) sustituir el agua potable (proveniente de la red) con otras fuentes, tales como la recogida y reutilización del agua de lluvia, tratamiento de aguas residuales y reciclaje de aguas de refrigeración.



En términos de consumo de energía, y su conservación, la mayor parte de la energía utilizada en un aeropuerto está asociada con la provisión de ventilación, aire acondicionado, calefacción e iluminación. La mayoría de los aeropuertos pequeños y medianos compran la electricidad a los suministradores de energía locales/regionales, por lo que cualquier reducción en el consumo de electricidad representará un ahorro de coste directo para el operador del aeropuerto. Mientras, la mayoría de los grandes aeropuertos tienen sus propias centrales eléctricas, aunque la tendencia en éstos es ir reemplazando la fuente u origen de la energía a una renovable (principalmente eólica y/o solar) (ICAO, 2016).

Gestión de residuos

La gestión y prevención eficaz de los residuos de los aeropuertos son cruciales para mantener el cumplimiento con las leyes y reglamentos ambientales. Las (buenas) prácticas sostenibles además de positivas para el medio ambiente también suelen ahorrar costos para el operador del aeropuerto.

Los residuos típicos generados en los aeropuertos son: a) residuos peligrosos de las instalaciones de mantenimiento; b) residuos (orgánicos e inorgánicos) de los concesionarios (comerciales) del aeropuerto; c) artículos confiscados de los controles de seguridad y el equipaje facturado; d) residuos de las operaciones de limpieza de las aeronaves; e) residuos provenientes de la construcción / obras civiles en el aeropuerto; f) residuos industriales; y g) aguas residuales y aguas pluviales contaminadas.

Los aeropuertos ya vienen trabajando en tres niveles de jerarquía para la gestión eficaz de los residuos generados: a) la prevención en la generación, lo que evita la producción (innecesaria) de residuos; b) políticas de reutilización; y c) estrategias de reciclaje (ICAO, 2016).

Desafíos claves

El desafío clave para el rendimiento medioambiental del aeropuerto es lograr "cero efectos" ambientales. El ruido y las emisiones de gases de efecto invernadero son las principales cuestiones ambientales a tratar / gestionar, seguidas, en importancia, y por la gestión del agua y residuos. El reto es diseñar estrategias conceptuales que puedan dirigirse a diferentes características particulares (según el lugar/país del aeropuerto) y que puedan ser utilizadas de manera aislada o en combinación para lograr la sostenibilidad del aeropuerto y la neutralidad por medio de cero efectos ambientales (ICAO, 2016; Kilgis y Kilgis, 2016; ACI Europe, 2015; ACRP, 2012; ACI, 2009).

Conclusiones

En este conciso artículo se analiza sobre el concepto de aeropuerto verde, un aeropuerto diseñado, operado y administrado de tal manera que su impacto ambiental se reduzca al mínimo y por lo tanto se vuelva sostenible. Como se ha presentado, el enfoque "verde" radica,



principalmente, en un conjunto de acciones (procesos y metodologías), políticas de gestión y de buenas prácticas y uso de nuevas tecnologías, para que, de forma armónica, se minimicen, o anulen totalmente, los impactos negativos que genera a diario la operación aeroportuaria.

Finalmente, el enfoque "sostenible" comprende el conjunto de desarrollos de la infraestructura aeroportuaria que inciden de manera directa en su entorno, permitiendo la generación de bienestar al socio-ecosistema de manera holística. Se puede decir entonces que un aeropuerto "verde" es el primer paso para convertirse en sostenible, pero esto solo puede ser alcanzado cuando se entiende que la infraestructura aeroportuaria tiene un rol fundamental y una responsabilidad más allá de sus límites físicos, cuando el aeropuerto se hace parte integral del desarrollo del territorio del cual hace parte.

Referencias

- ACC. (2017). Airport carbon accreditate. Recuperado de <http://www.airportcarbonaccreditation.org/>
- ACI Europe. (2015). "Green Airports." ICAO Intl. Aviation and Environment Seminar, Warsaw, 19 March 2015.
- ACI. (2009). Guidance Manual: Airport Greenhouse Gas Emissions Management. Montreal: ACI.
- ACRP. (2012). Guidebook for Incorporating Sustainability into Traditional Airport Projects. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- ACRP. (2008). Airport Sustainability Practices. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- BREEAM. (2017). Página web. Recuperado de <http://www.breeam.com/>
- De Neufville, R. y Odoni, A. (2013). Airport Systems, Planning, Design, and Management. New York: McGrawHill.
- Ferrulli, P. (2016). Green Airport Design Evaluation (GrADE) – methods and tools improving infrastructure planning. Transportation Research Procedia, 14, 3781-3790.
- ICAO. (2016). Environmental Report. Montreal: ICAO.
- ICAO. (2013). Assembly Resolutions in Force. Doc 10022. Montreal: ICAO.
- ICAO. (2008). Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management. Montreal: ICAO.



Janic, M. (2011). *Greening Airports, Advanced Technology and Operations*. London: Springer-Verlag.

Kilkis, S. y Kilkis, S. (2016). Benchmarking airports based on a sustainability ranking index. *Journal of Cleaner Production*, 130, 248-259.

LEED. (2017). U.S. Green Building Council. Recuperado de <http://www.usgbc.org/leed>

OACI. (2008). Anexo 16. Protección del Medio Ambiente. Volumen I. Ruido de las aeronaves. Montreal: OACI.

OACI. (2002). *Modelo de planificación de aeropuertos. Parte 2: Utilización del terreno y control del medio ambiente*. Montreal: OACI.

OACI. (1999). *Manual-guía de protección ambiental para aeropuertos*. Montreal: OACI.



CAPÍTULO III. Track de investigación maestría

aciones
obtención de



Carlos Alberto Gómez Cardona⁸

Resumen

Las aeronaves UH-60 de la Fuerza Aérea Colombiana están sometidas constantemente a un uso intenso dados los requerimientos operativos que por su naturaleza y configuración de combate se les exige. En ya casi 30 años de operación de este tipo de aeronave se ha venido presentando un fenómeno de envejecimiento de su estructura y ha iniciado la aparición de fallas en componentes críticos que derivan la paralización de estas.

El presente documento muestra una breve historia y descripción de la estructura de estas aeronaves, así como una serie de conceptos básicos de resistencia de materiales y de propiedad intelectual. También describe algunos puntos importantes de una investigación realizada por personal orgánico del Comando Aéreo de Combate n.º 5 en asociación con la empresa Inter-telco y Colciencias, bajo la cual se logró realizar una serie de actividades para la medición de microdeformaciones en un componente estructural primario.

Al ser la Fuerza Aérea Colombiana el único operador en el mundo de aeronaves UH-60 en configuración Arpía IV, cobra una gran relevancia este tipo de investigaciones, las cuales se convierten en las primeras efectuadas en este tipo de aeronaves. Si bien en el mundo hay aeronaves que cumplen misiones similares, el desarrollo del proyecto Arpía IV fue hecho bajo los requerimientos exigidos por la Fuerza Aérea a la empresa Raphael, garantizando así ser un sistema de armas único a nivel mundial.

Palabras clave: galgas extensiométricas, microdeformaciones, patente de invención, propiedad intelectual, resistencia de materiales.

Introducción

La Fuerza Aérea Colombiana, y específicamente el Comando Aéreo de Combate n.º 5, han realizado esfuerzos importantes para asegurar la alta disponibilidad de aeronaves UH-60. Esta disponibilidad se ha visto altamente afectada por consecuencia del evidente envejecimiento de este equipo, causa principal de la aparición de fallas estructurales críticas.

De acuerdo con el documento SES-700700 se establece que los helicópteros UH-60L no requieren mantenimiento mayor estructural antes de las 8.000 horas de vuelo. Sin embargo, en una reunión realizada con ingenieros de Sikorsky en el mes de julio del año 2014 en el CACOM-5, se concluyó que el mantenimiento mayor estructural del helicóptero se hace por condición.

⁸ Capitán. Grupo de investigación CIPAER. Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: capeto700@gmail.com



En este sentido, la FAC ha buscado la forma de disminuir la incertidumbre que genera un mantenimiento por condición, razón por la cual se adelantó durante el año 2014 una convocatoria para que, con un dinero asignado por Colciencias, se establecieran herramientas que puedan ayudar en este sentido.

Producto de esta convocatoria, junto con la empresa Inter-telco, la sección de ingeniería del CACOM-5 realizó una serie de investigaciones respecto a herramientas y técnicas apropiadas para la medición de esfuerzos presentes durante las fases de vuelo en los componentes estructurales de las aeronaves UH-60.

Esta información, obtenida durante el año 2015, se pretende proponer a un proceso de vigilancia tecnológica con el que la Fuerza Aérea pueda determinar la pertinencia de someterse a otro proceso para obtener la propiedad intelectual.

Con este método, la Fuerza Aérea da un paso importante hacia la implementación de herramientas que soportan los estudios de confiabilidad y de ingeniería encaminados al mantenimiento predictivo, pues se lograrán obtener datos que en un principio solo son conocidos por los fabricantes de componentes estructurales. Estos datos, sometidos a estudios más profundos, pueden convertirse en asiento científico para tomar decisiones que garanticen una mayor disponibilidad de las aeronaves para el cumplimiento de la misión de la Fuerza Aérea.

Marco teórico

El UH-60 en la Fuerza Aérea Colombiana

El UH-60 es un helicóptero de fabricación norteamericana. Esta aeronave fue concebida como reemplazo de los ya viejos helicópteros UH-1 Huey utilizados en la guerra de Vietnam por el US ARMY para realizar tareas de transporte de tropas y asalto aéreo. Con la necesidad de un helicóptero de mejores prestaciones, el US ARMY adelantó el UTTAS (Sistema Aeronáutico de Transporte Táctico Utilitario) bajo el cual entraron a competir dos grandes fabricantes: Boeing y Sikorsky Aero Engineering Company. Esta última fue la ganadora con su modelo UH-60, el cual efectuó su primer vuelo el 17 de octubre de 1974 (González y Monterrubio, 2010).

En el año de 1988 llegaron las primeras aeronaves de este tipo a la Fuerza Aérea Colombia (Hernández, 2015), a partir de allí fue adquirida de manera paulatina la nueva versión de estas aeronaves, el UH-60L el cual conserva los principios de diseño del modelo anterior, pero le incorpora unos motores con un mejor rendimiento, una transmisión principal más robusta, un gancho para operar cargas externas de mayor capacidad y un sistema de reducción de infrarrojos generados por los motores. En el año 2017 la FAC cuenta con 25 de estas aeronaves operativas, de las cuales solo conserva una en versión UH-60^a, que ya se encuentra en proceso de modernización a la versión UH-60L.

Descripción general de la estructura de un helicóptero UH-60L



La aeronave UH-60L es un helicóptero construido estructuralmente bajo conceptos de falla segura y tolerancia al daño (Sikorsky Aircraft Corporation, 1997), lo cual teóricamente garantiza que cualquier novedad estructural, como lo puede ser una rajadura, es detectable en su fase de formación o crecimiento, sin que esta haya llegado a un tamaño crítico que pueda generar una pérdida de la integridad estructural de manera súbita o catastrófica, igualmente la estructura está configurada de una manera que las cargas soportadas por un componente que presente alguna falla, puedan ser asumidas por otro componente estructural.

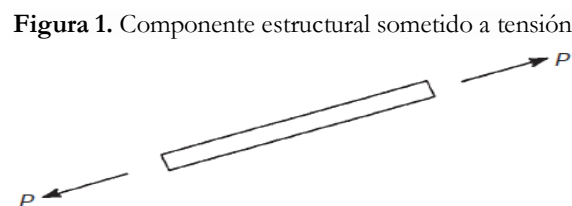
El manual TM 1-1520-237-23-1 en el *Work Package* 003 describe que la estructura primaria de la aeronave está construida en aleaciones de aluminio, también se encuentran algunos elementos como paredes de fuego y herrajes en titanio y acero. Los componentes no estructurales de la aeronave están fabricados en plástico reforzado. La estructura se divide en seis secciones: la cabina de pilotos o sección de nariz, cabina, sección transición, cono de cola, mástil de rotor de cola y mástil de rotor principal (Headquarters, Department of the Army, 2013).

Conceptos básicos de resistencia de materiales

Todas las estructuras metálicas diseñadas y construidas por el ser humano tienen dos condiciones fundamentales para cumplir su función: resistencia y rigidez, las cuales al ser evaluadas se puede determinar si son o no son seguras y funcionales, ya que una deformación excesiva o la ruptura súbita debe ser inadmisibles. La resistencia de materiales se ocupa de realizar esta evaluación, garantizando que las fuerzas internas, que son las que al final generan los esfuerzos que producen deformaciones y rupturas, no excedan los límites con relación a la geometría y al material con el cual se encuentra diseñada una estructura (Salazar, 2007).

Un paso importante para evaluar las estructuras es determinar la forma en que están siendo aplicadas las cargas (axiales, biaxiales, triaxiales, entre otros) lo que determina los tipos de esfuerzos⁹ que están soportando internamente los componentes de una estructura, Salazar (2007) presenta una clasificación de estas cargas:

Tensión: es uno de los dos tipos de cargas axiales que son aplicadas de manera longitudinal a un componente estructural. Para este caso, la acción generada por la carga sobre este es el incremento en la longitud (figura 1).



Fuente. Megson (2005, p. 43).

⁹ El esfuerzo está definido como la fuerza interna que ofrece un componente estructural como respuesta a las cargas aplicadas al mismo. Los esfuerzos están en función de las cargas aplicadas y del área de la sección transversal del componente estructural **Fuente especificada no válida.**



Compresión: es el segundo de los tipos de las cargas axiales. Al igual que la tensión es aplicada de manera longitudinal a un componente estructural, pero la diferencia es que esta carga genera una reducción en la longitud del mismo (figura 2).

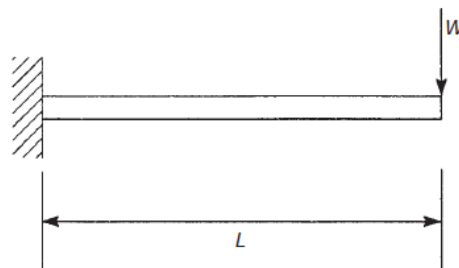
Figura 2. Componente estructural sometido a compresión



Fuente: Megson (2005, p. 43).

Corte: son las cargas que actúan de manera perpendicular al eje longitudinal del componente estructural.

Figura 3. Componente estructural sometido a cortante



Fuente: Megson (2005, p. 43).

Flexión: son las cargas que actúan en un componente estructural producto de otro tipo de cargas aplicadas a componentes estructurales adyacentes (figura 5), esto ante la dificultad de aplicar una carga a flexión pura como la que se describe en la figura 4 (Megson, 2005).

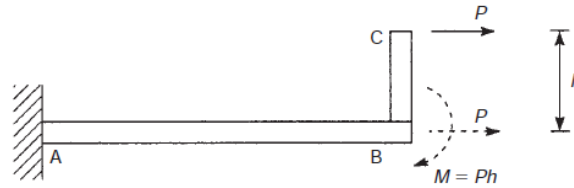
Figura 4. Componente estructural sometido a flexión pura



Fuente: Megson (2005, p. 44).



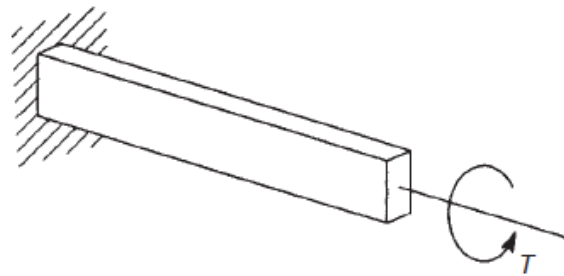
Figura 5. Componente estructural sometido a flexión



Fuente: Megson (2005, p. 44).

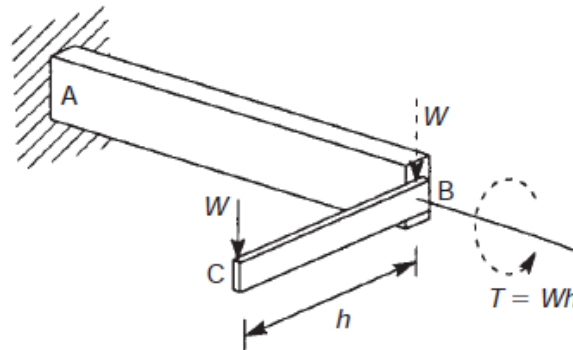
Torsión: al igual que el caso de la flexión, la aplicación de un esfuerzo de torque puro como el descrito en la figura 6 solo puede ser posible como resultante de esfuerzos de cortantes aplicados a componentes estructurales adyacentes (figura 7).

Figura 6. Componente estructural sometido a torque puro



Fuente: Megson (2005, p. 45).

Figura 7. Componente estructural sometido a torque



Fuente: Megson (2005, p. 45).

Por otro lado, los materiales en los que son construidas las estructuras tienen unas propiedades que para el caso de estudio en el presente documento es importante tener en consideración.

Para Megson (2005), los materiales pueden ser clasificados en dos grandes grupos: dúctiles y frágiles. Para entender esta clasificación, en su libro *Structural and Stress Analysis* explica algunas propiedades sobre las cuales basa su clasificación:



Elasticidad: un material es considerado elástico cuando las deformaciones producidas por una carga desaparecen cuando esta deja de ser aplicada. Megson (2005) afirma que todos los materiales de ingeniería conocidos son considerados linealmente elásticos cuando la deformación es directamente proporcional al esfuerzo aplicado dentro de ciertos límites definidos.

Plasticidad: propiedad que tiene un material de mantener la deformación provocada por las cargas aplicadas después de que estas desaparecen (Megson, 2005).

De este modo, la clasificación anteriormente mencionada se puede explicar de la siguiente manera:

Materiales dúctiles: la ductilidad es la capacidad que tiene un material de resistir altas cargas aplicadas antes de que una fractura ocurra. Es característico de estos materiales que antes de fallar por fractura, se pueda visualizar un cambio en las dimensiones de su área transversal. El aluminio y algunas de sus aleaciones cuentan con esta propiedad. Los materiales dúctiles son considerados elastoplásticos, toda vez que tienen un comportamiento elástico hasta que el límite elástico¹⁰ es superado en razón a las cargas aplicadas, posterior a esto su comportamiento es plástico (Megson, 2005).

Materiales frágiles: un material frágil presenta muy poca deformación antes de fracturarse. Normalmente pueden fallar de manera súbita sin que presenten ningún síntoma de alerta. Entre los metales que se pueden considerar frágiles están el hierro fundido y aceros de alta resistencia (Megson, 2005).

Fallas comunes en componentes estructurales metálicos

Deformación: es considerada como falla la deformación excesiva de un componente estructural si este deja de cumplir la función principal para la cual fue diseñado. Esta deformación puede estar en función de las cargas aplicadas o de altas temperaturas de funcionamiento (Johnson et al., 2011).

Fractura: la Real Academia Española (2014) define la palabra fractura como “acción y efecto de fracturar”, a su vez define la palabra fracturar como “romper o quebrantar con violencia algo”. Este tipo de falla Johnson et al. (2011) las clasifica de acuerdo con su modo en estática, por fluencia y dinámica.

La fractura estática está asociada a niveles de esfuerzos superiores a los que un espécimen puede soportar, ya sea por factores de diseño o existencia de una rajadura en tamaño crítico que comprometa la integridad del sistema (Johnson et al., 2011).

La fractura por fluencia está asociada a componentes que trabajan en altas temperaturas. Generalmente se presentan por una mala selección del material o un mal análisis del entorno de

¹⁰ El límite elástico es definido por Urbán Brotóns **Fuente especificada no válida**, como la carga unitaria aplicada a un espécimen donde se inicia la deformación plástica, en otras palabras, es la tensión bajo la cual las deformaciones no son recuperables. Para una mejor interpretación del concepto se recomienda revisar el anexo A al presente documento, donde se presenta la gráfica de tensión frente a las deformaciones. Para dicha gráfica el punto de finido como σ_{pr} es el límite elástico.



operación. Estos componentes sufren deformación en función de la temperatura y de los esfuerzos a los cuales son sometidos (Johnson et al., 2011).

La fractura dinámica está asociada a la fatiga del material, esta ocurre por estar sometida a repetitivos ciclos de aplicación de cargas y se presenta cuando pequeñas deformaciones plásticas se acumulan hasta llegar a un punto crítico (Johnson et al., 2011).

Pérdida de material: generalmente dicha falla está asociada a fenómenos como la corrosión, la oxidación a altas temperaturas, la erosión, el desgaste o el uso (Johnson et al., 2011).

Tolerancia al daño

La tolerancia al daño es la habilidad que posee una estructura de no presentar fallas súbitas y/o catastróficas aun con la presencia de defectos, rajaduras u otro daño por un periodo de tiempo suficiente hasta que estos sean detectados. Esta filosofía está muy ligada a la de falla segura, la diferencia radica en que esta considera el crecimiento de un defecto generado durante la fabricación o durante su vida de servicio (Reddick Jr).

Todos los criterios de tolerancia al daño están direccionados bajo dos consideraciones: el estrés residual estático y la propagación del daño, ambos se encuentran en función del material en el que está construida la estructura y la geometría de esta.

Reddick Jr (s.f.) expone tres puntos bajo los cuales se soporta la filosofía de la tolerancia al daño:

- Aceptar que el daño va a ocurrir.
- Una adecuada técnica de inspección puede detectar el daño.
- Mantener un esfuerzo adecuado en la estructura dañada.

Aparentemente, este es un concepto nuevo, pero como afirma Reddick Jr (s.f.), desde el siglo XV Leonardo da Vinci tuvo consideraciones que tienen este enfoque.

Medición de deformaciones

Existen diferentes tipos de circuitos electrónicos de medición que son utilizados en captar el fenómeno físico de cambio de dimensiones en elementos que son sometidos a cualquier tipo de cargas. En todos, el concepto de funcionamiento es el mismo: los cambios de dimensiones son convertidos en una señal eléctrica (Nawrocki, 2005). Estos elementos son denominados galgas extensiométricas y son usadas en muchos tipos de sensores.

Según Wilson (2005), en la industria se pueden encontrar desde galgas extensiométricas líquidas¹¹, cables metálicos usados como galgas extensiométricas, galgas extensiométricas de

¹¹ Las galgas extensiométricas líquidas usan la resistencia de un fluido incompresible (comúnmente mercurio) que se encuentra dentro de un tubo elástico. Dos electrodos metálicos miden la resistencia del fluido y la variación en



película delgada, hasta galgas extensiométricas de fibra óptica. Estas últimas con un concepto de funcionamiento diferente al explicado en el párrafo anterior.

Las galgas extensiométricas usadas en la medición de deformaciones en componentes estructurales son transductores cuyo principio de funcionamiento se basa en la variación de la resistencia de un conductor o semiconductor, generada por tres características fundamentales: la deformación a la que se somete el medidor, el material con el que fue construido y la configuración que posee. Estas galgas son fijadas al componente estructural que se pretende evaluar, así cuando los esfuerzos mecánicos generen una deformación, las resistencias de la galga sufrirá pequeños cambios que se traducen en diferencias de voltaje (Alzate, Montes y Silva, 2007).

Para Megson (2005), es importante tener en consideración que las galgas extensiométricas miden directamente deformaciones, pero para determinar niveles de esfuerzos soportados por un espécimen en un punto específico se deben utilizar galgas extensiométricas tipo “roseta”, nombre dado como anglicismo de la palabra *rosette*. Estas galgas a su vez están formadas por tres galgas extensiométricas inclinadas comúnmente a 45° o 60° la una de la otra.

Para Murray y Miller (1992), este ángulo de separación entre las galgas no refiere una particular importancia, siempre y cuando sean equiangulares, pues a la larga depende de preferencias a la hora de resolver las ecuaciones para determinar niveles de estrés.

Puente de Wheatstone

Puente es el nombre dado a una serie de circuitos electrónicos utilizados para realizar algún tipo de medición, que en una gran frecuencia es una medición de resistencia. Los puentes tienen gran aplicabilidad cuando es requerido determinar con una gran exactitud una resistencia en particular. Charles Wheatstone efectuó una mejora al puente inventado por Samuel Christie, de ahí que el nombre comercial es el Puente de Wheatstone. Este puente específicamente es utilizado para medir resistencias desde miliohms hasta megohms con una exactitud del 0,1 % (Wolf y Smith, 1992).

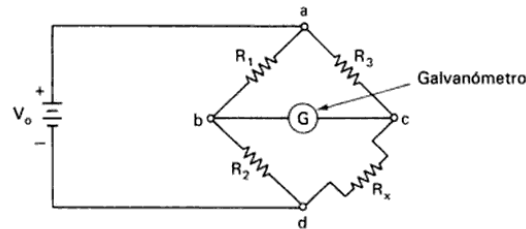
En la figura 8 se grafica la configuración del circuito del Puente de Wheatstone, donde la resistencia desconocida corresponde a R_x , las resistencias conocidas corresponden a R_1 , R_2 y R_3 y se considera el circuito en balance (el voltaje V_0 se divide en partes iguales por los caminos abd y acd), teniendo lo siguiente:

Figura 8. Circuito del Puente de Wheatston

$$\frac{R_x}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

esta se presenta a medida que las fuerzas se aplican a lo largo del tubo, reduciendo el diámetro, pero manteniendo el volumen del líquido constante (Wilson, 2005).



Fuente: Wolf y Smith (1992).

La propiedad intelectual

Si bien la discusión a nivel mundial sobre la propiedad intelectual ha tenido un mayor asentamiento en las últimas cuatro décadas, se tienen registros de patentes de invención en las cortes de Florencia y Venecia en el siglo XV. Las razones por las cuales se ha venido dando una mayor importancia al tema de la propiedad intelectual, tiene su origen en la acelerada y exitosa participación de las empresas norteamericanas en los ámbitos de la farmacéutica, la investigación y los desarrollos tecnológicos vividos en década de los 70. Estas compañías al ver que empresas extranjeras y competidoras directas se estaban copiando con gran facilidad muchos de estos desarrollos, decidieron hacer uso de su poder empresarial y lograron incluir ese tema en la agenda legislativa, acción que trajo como consecuencia los primeros cambios en la ley. Estos cambios generaron que en los años 80 creciera de manera significativa el registro de patentes en la economía estadounidense, y que otros países empezaran a interpretar de igual forma la necesidad e importancia de la protección a todos los esfuerzos nacionales por desarrollar e investigar en nuevos temas (Abarza y Katz, 2002).

Fue un hito importante el fenómeno causado en Estados Unidos descrito anteriormente, gracias a ello, en la actualidad se puede hablar de propiedad intelectual, conceptos que se encuentran internacionalizados y plasmados en la Convención de París para la Propiedad Intelectual de 1883¹², y la Convención de Berna para la Protección de las Obras Literarias y Artísticas en 1886, ambos firmados por Colombia (Díaz, 2008).

La Organización Mundial de la Propiedad Intelectual¹³ define la misma como la protección de todo lo que pueda crear la mente humana: inventos, obras artísticas, símbolos usados en el comercio, entre otras. La Propiedad Intelectual se encuentra dividida en 2 categorías: propiedad industrial (inventos, marcas, diseños industriales, modelos de utilidad) y derechos de autor (obras literarias, obras artísticas, música, películas, diseños de software). La propiedad intelectual es a cualquier otro derecho de propiedad, donde el que la posee puede explotarla y beneficiarse que lo que derive su creación u obra. (OMPI).

¹² La Convención de París para la Propiedad Intelectual es considerada la base de la codificación moderna de los temas de propiedad intelectual.

¹³ Organismo adscrito a la ONU especializado en temas de propiedad intelectual. Este organismo busca la cooperación entre los estados para fomentar la protección de la propiedad intelectual en todo el mundo, y también busca la cooperación administrativa entre las diferentes uniones de propiedad intelectual (Abarza y Katz, 2002).



La propiedad intelectual es vista en Colombia como un incentivo para fortalecer una base de producción de conocimiento y como una herramienta para mejorar los niveles de competitividad y productividad de los diferentes sectores económicos. Producto de esta visión y ante la necesidad de brindar garantías para el pleno ejercicio de los derechos de propiedad intelectual, el gobierno colombiano evidenció la necesidad de gestionar a los diferentes actores que forman parte del Sistema de Propiedad Intelectual (Departamento Nacional de Planeación, 2008).

La Fuerza Aérea Colombiana a través de la Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación y su Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación - SCTeI¹⁴ acoge la clasificación que realiza la OMPI en cuanto a las categorías en que se divide la propiedad intelectual, ya explicado en el presente numeral (Fuerza Aérea Colombiana, 2015).

Para el caso de la propiedad industrial, los Estados cuentan con una serie de herramientas para garantizar la protección de los inventos. Algunas de esas herramientas son las patentes de invención, patentes de modelos de utilidad y diseños industriales.

Al interior de la Fuerza Aérea Colombiana, toda nueva creación o cualquier desarrollo intelectual con aplicación industrial se le deberá ser aplicada la gestión de la propiedad industrial, siempre y cuando sea protegible y de que exista un interés por parte de la institución de apropiarse de los resultados. Para definir dicho interés, la FAC cuenta con la Oficina de Transferencia Tecnología OTT-FAC quienes evaluarán la funcionalidad técnica del desarrollo y realizará un análisis comercial para categorizar el producto. Del resultado de dicha evaluación la FAC determina si se procede o no con el proceso de protección (Fuerza Aérea Colombiana, 2015).

Las patentes de invención

Las patentes son derechos exclusivos concedidos a las personas u organizaciones que generen invenciones. Quien posea una patente, garantiza que su invención será protegida generalmente por veinte años. Durante este tiempo, el titular será el beneficiado de la explotación de esta. La protección que brindan las patentes se resume en que el invento no podrá ser fabricado, comercializado o utilizado sin autorización expresa del titular (OMPI, s.f.).

Por medio de las patentes, el Estado reconoce a los inventores los esfuerzos realizados para encontrar soluciones a problemas que presenta la humanidad. En Colombia, la legislación que rige el tema de las patentes es la Decisión 486 de 2000 de la Comisión de la Comunidad Andina (SIC, 2017). A su vez, la Superintendencia de Industria y Comercio ha emitido una circular única donde se establecen las directrices para la realización de los trámites de obtención de propiedad industrial.

¹⁴ El Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación – SCTeI está definido en el Modelo de Investigación del Sistema Educativo de la Fuerza Aérea Colombiana (MOINV, 2015) como “un sistema abierto, no excluyente, del cual forman parte todos los programas, estrategias y actividades en ciencia, tecnología e innovación, consistentes con las prioridades establecidas en el PEI 2011-2030”.



Modelos de utilidad

La diferencia con las patentes de invención radica en que estas consisten en nuevas formas o configuración a inventos ya registrados que generan una nueva utilidad, efecto o ventaja que antes no poseían. Su protección se extiende hasta por diez años. Estas patentes solo conciben la protección de inventos de producto y deben tener aplicación industrial (SIC, 2017).

Al igual que las patentes de invención, la legislación que rige el tema de las patentes para Colombia es la Decisión 486 de 2000 de la Comisión de la Comunidad Andina y la circular única de la Superintendencia de Industria y Comercio.

Figura 9. Sistema de Propiedad Intelectual



Fuente: Departamento Nacional de Planeación, (2008, p. 8)

Las solicitudes de patentes de invención o modelos de utilidad pueden ser presentadas como una solicitud de patente nacional, como una solicitud de patente internacional o como una solicitud de patente regional. La elección de donde debe ser presentada radica en su nivel inventivo, el mercado de interés, la seguridad de que la solicitud tenga éxito y los recursos con los que cuente la organización que va a aplicar al proceso de protección. La Fuerza Aérea Colombiana tiene definido el siguiente orden para proteger una patente de invención o un modelo de utilidad: primero una solicitud nacional, seguida de una solicitud internacional y nuevamente una solicitud nacional o regional en los países diferentes a Colombia donde se desea proteger la invención (Fuerza Aérea Colombiana, 2015).



Diseños industriales

La Superintendencia de Industria y Comercio define este concepto como “la forma externa bidimensional o tridimensional de un producto que le otorga una apariencia particular a este”.

A diferencia de los inventos, los diseños industriales no se patentan, sino que se registran, y buscan proteger únicamente la forma de algún producto, y mediante la protección se está reconociendo el esfuerzo intelectual que conlleva diseñar dicha forma (SIC, 2017).

Medición de microdeformaciones en la Fuerza Aérea Colombiana

Recientemente la Fuerza Aérea Colombiana por medio de la Sección Certificación de la Defensa, ha venido realizando una serie de ejercicios de mediciones del comportamiento estructural de la aeronave T-90 Calima, con el fin de cumplir los requisitos de certificación de la aeronave.

Estas actividades han derivado en el interés de algunas dependencias del Comando Aéreo de Combate n.º 5 de utilizar algunas de estas herramientas para determinar y caracterizar el comportamiento estructural de la aeronave UH-60. Este interés dio como resultado que en el año 2014 mediante la convocatoria de Colciencias n.º 666 se obtuviera la financiación del proyecto de investigación con código 606466640176: “Modelación y análisis de la estructura del helicóptero UH-60” (Colciencias, 2014).

Este proyecto le permitió al Comando Aéreo de Combate n.º 5 y a la empresa Inter-telco, desarrollar unos trabajos específicos sobre el componente estructural más grande que posee una aeronave UH-60: el herraje superior de la estación 308. En este componente de la aeronave FAC 4124 fueron instaladas 4 galgas extensiométricas sobre una de las áreas que tradicionalmente presentan algún tipo de falla.

Actualmente, y con el apoyo del Centro de Metrología del Comando Aéreo de Mantenimiento, también le fueron instaladas galgas extensiométricas a la aeronave FAC 4138, esta vez en otros componentes estructurales importantes que posee la aeronave, con el fin de realizar un estudio de ingeniería y apoyar la toma de decisiones al interior del Grupo Técnico del Comando Aéreo de Combate n.º 5.

También, al interior del Centro de Desarrollo Aeroespacial - CETAD se vienen adelantando investigaciones para integrar lo logrado en el año 2014 con el proyecto “Modelación y análisis de la estructura del helicóptero UH-60” a un sistema de adquisición de datos de comportamiento en vuelo de la aeronave, para cruzar la información obtenida de deformaciones con maniobras específicas y en un momento específico. Estas mejoras que se desean hacer al sistema y lo realizado por la Sección Ingeniería del CACOM-5 se encuentran fuera del alcance del presente proyecto.



Metodología

La Fuerza Aérea Colombiana es el único operador que existe en el mundo de las aeronaves UH-60 en configuración de ataque Arpía IV. Esta característica distintiva permite que este tipo de investigaciones sean consideradas de carácter exploratorio.

Por otro lado, el poder establecer de una manera técnica y de alta precisión datos que puedan describir los comportamientos estructurales de las aeronaves UH-60 de la Fuerza Aérea Colombiana, tiene un componente de investigación descriptiva.

La metodología desarrollada durante la investigación puede ser plasmada en las siguientes fases:

Fase 1. Análisis del mapeo estructural de las aeronaves UH-60 de la Fuerza Aérea Colombiana. Este puede considerarse el paso inicial para el desarrollo de cualquier herramienta de medición de la condición de la estructura de las aeronaves UH-60. Un análisis completo del mapeo estructural puede definir las zonas de mayor ocurrencia de fallas estructurales y zonas que impactan la integridad estructural de la aeronave. Esta información se puede considerar la hoja de ruta que orientará las decisiones sobre qué áreas censar y analizar.

Fase 2. Verificación de la información recopilada durante la ejecución del proyecto de investigación con código 606466640176 Modelación y análisis de la estructura del helicóptero UH-60, perteneciente a la convocatoria de Colciencias n.º 666. Durante este proyecto se avanzó de manera significativa por parte del Comando Aéreo de Combate n.º 5 en la implementación de herramientas que permitan visualizar el comportamiento estructural de las aeronaves que tiene logísticamente asignadas. Producto de todo el proceso de investigación se pudo establecer la clase de galgas que es recomendable utilizar en zonas de altos niveles de estrés, se definieron los procedimientos de instalación de dichas galgas basados en las recomendaciones de la empresa que las fabrica. Así mismo, se efectuó un análisis de las alternativas que hay en el mercado de hardware que puede ser utilizado para obtener, recopilar y almacenar la información a medir.

Durante el proceso de investigación se logró instrumentar el herraje superior de la STA 308 de la aeronave FAC 4124, esta aeronave fue sometida a un vuelo de prueba en el que se hicieron las maniobras típicas de una aeronave Arpía. De este ejercicio también se generó información valiosa que debe ser tenida en cuenta durante la presente fase.

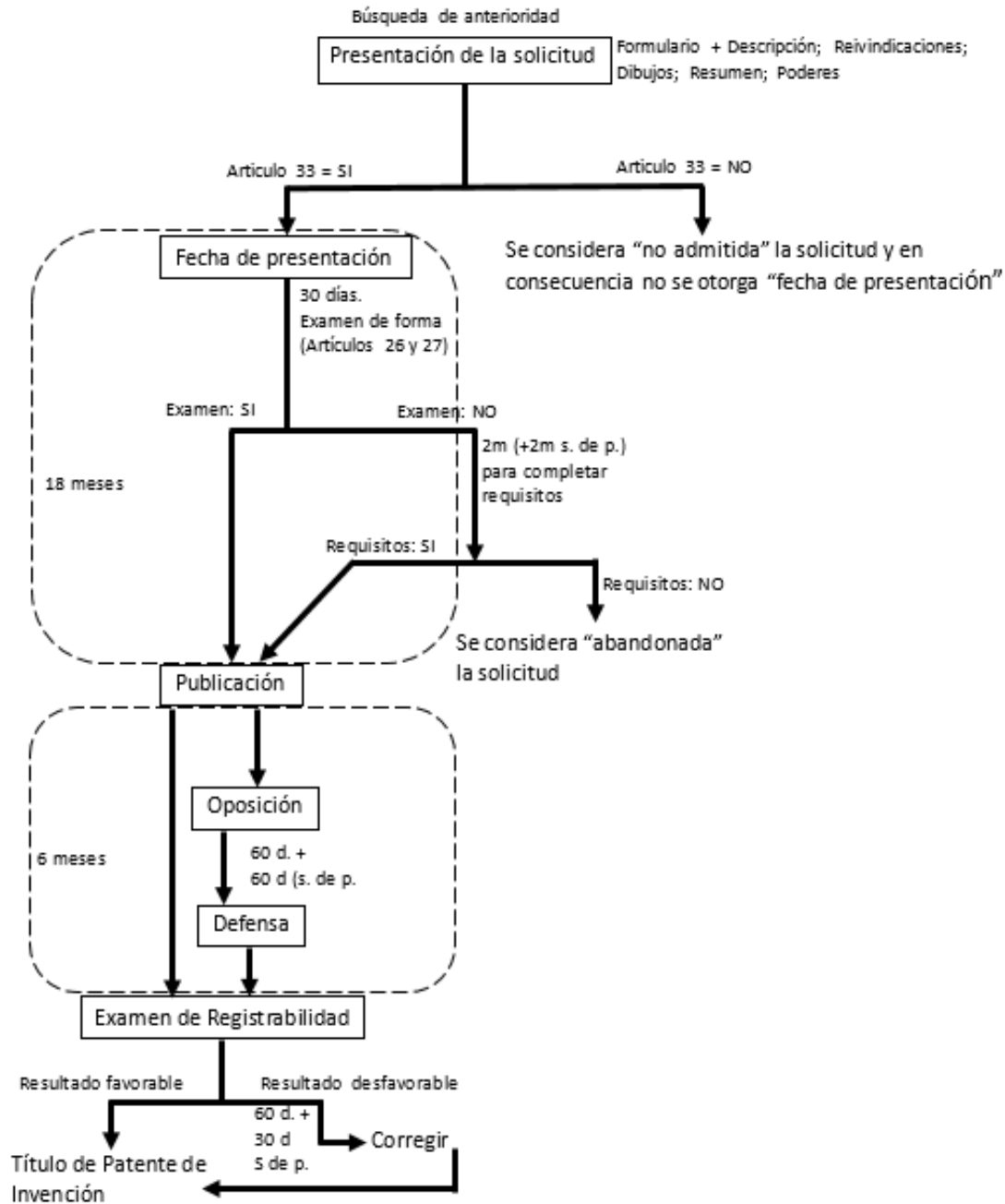
Fase 3. Verificación de la aplicación de la metodología de vigilancia tecnológica descrita por el Ministerio de Defensa Nacional. De acuerdo con el Modelo de Investigación del Sistema Educativo de la Fuerza Aérea Colombiana - MOINV, todos los mecanismos de protección y registro de invenciones derivadas de proyectos de investigación realizados por personal orgánico de la FAC son responsabilidad de la Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación - DICTI (Fuerza Aérea Colombiana, 2015). En ese sentido la mencionada dirección ha realizado una serie de actividades de vigilancia y tecnología a los resultados obtenidos del proyecto de investigación con código 606466640176 “Modelación y análisis de la estructura del helicóptero UH-60” perteneciente a la convocatoria de Colciencias n.º 666. En esta fase se busca efectuar la revisión del procedimiento



desarrollado al interior de la FAC y que cumpla con la metodología propuesta por el Ministerio de Defensa Nacional.

Fase 4. Recopilación de la documentación requerida para trámite de obtención de propiedad intelectual. Es una fase directamente asociada a los resultados obtenidos en la fase 3. De ser aprobado por parte de DICTI se debe iniciar el proceso de obtención de la propiedad intelectual y recopilar la documentación necesaria para la obtención de una patente de invención. Para completar dicha documentación se tendrá en consideración lo descrito en el anexo H del Modelo de Investigación del Sistema Educativo de la Fuerza Aérea Colombiana - MOINV, y el cual se presenta a continuación.

Figura 10. Solicitud patente de invención



Fuente: Fuerza Aérea Colombiana (2015, p. 83).

Resultados esperados

Procedimiento para efectuar la medición de las microdeformaciones estructurales en aeronaves UH-60L de la FAC. De todo el proceso desarrollado en el proyecto de investigación con código 606466640176 “Modelación y análisis de la estructura del helicóptero UH-60”, se obtuvieron avances



significativos para apoyar y obtener este resultado esperado. Entre los avances más significativos se pueden nombrar los siguientes:

- *Selección del hardware requerido para efectuar las mediciones:* la selección de estos componentes fue producto de una evaluación realizada a diferentes tipos de sensores y sistemas de adquisición de datos. También jugó un papel importante las necesidades y restricciones planteadas desde la Sección Ingeniería del Grupo Técnico del Comando Aéreo de Combate n.º 5. Otro aspecto que se tuvo en cuenta fue la asignación de recursos para el proyecto. Conjugando todo lo anterior, fueron seleccionados los siguientes equipos:
 - Galgas extensiométricas biaxiales ref.: 1-XY93-3/350.
 - Cables de conexión de fluoropolímero blanco ref.: 1-3301.0094-W.
 - Terminales de soldadura ref.: LS5.
 - Sistema de adquisición de datos CompactRIO 9063.
 - Módulo de galga extensiométrica de cuarto de puente NI 9236.
 - Batería de alimentación M-Tek ref.: 12120.
- *Creación del software de adquisición de datos.* En este aspecto se elaboró por medio de LabVIEW un software que se compone de 4 etapas (figura 11). Cada una cumple un papel importante a la hora de procesar la información que será suministrada por las galgas extensiométricas (Inter-telco SAS, 2015).

Figura 11. Etapas del software de adquisición de datos



Fuente: Inter-telco SAS (2015, p. 3).

Dadas las limitaciones de memoria del hardware seleccionado, cada 20 minutos se hace la extracción de la información almacenada. La información es generada en archivos con extensión tdms. Este formato permite ser visualizado tanto en Excel como en un software desarrollado por la National Instruments, llamado Diadem (Inter-telco SAS, 2015).

Proceso de vigilancia tecnológica desarrollado por la FAC. Este resultado es el paso inicial para cumplir uno de los objetivos trazados en el proyecto. De la vigilancia tecnológica desarrollada por la Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación - DICTI, se puede desprender un concepto positivo para iniciar los procesos de obtención de propiedad intelectual por medio de una patente. Ya la DICTI ha dado algunos pasos en este sentido, apoyándose en la información suministrada por el autor del presente documento.

Documento donde se describan las zonas críticas de las aeronaves UH-60L donde se pueda replicar el modelo. El poder ser utilizado en diferentes ubicaciones de la aeronave es una de las grandes virtudes de este método de medición de microdeformaciones. Resta efectuar una revisión a la información técnica que se tiene de las fallas estructurales más comunes en el equipo UH-60 de la Fuerza Aérea Colombiana, y un análisis juicioso del ejercicio de mapeo estructural que se lleva en la



Sección Ingeniería del Comando Aéreo de Combate n.º 5. Así, se tienen herramientas con sustento técnico, y este tipo de decisiones no se dejan a juicios subjetivos que puedan llevar a generar desgaste y mal uso de los recursos que se tienen para la ejecución de este tipo de proyectos de investigación.

Conclusiones

El método de medición de microdeformaciones en la estructura durante las diferentes fases de vuelo de las aeronaves UH-60 de la FAC, es una herramienta completamente útil para obtener información que normalmente se reserva para los fabricantes. Con esta información se puede dar un paso adelante para el desarrollo de herramientas que soporten la ejecución de programas de mantenimiento mayor estructural.

El método de medición de microdeformaciones planteado en el proyecto de investigación con código 606466640176 Modelación y análisis de la estructura del helicóptero UH-60 debe ser complementado con herramientas que permitan efectuar una correlación de las microdeformaciones con las condiciones y fases de vuelo.

La hoja de ruta para definir las zonas candidatas a ser evaluadas y censadas tiene su origen en un estudio juicioso del mapeo estructural de las aeronaves UH-60. El tener esta información clara puede ayudar a una acertada toma de decisiones y una mayor eficiencia en la ejecución de los recursos puestos a disposición de este tipo de proyectos.

La Fuerza Aérea Colombiana como autoridad aeronáutica de la aviación del Estado, posee el personal idóneo y las herramientas necesarias para aprobar la ejecución de este tipo de métodos de medición en las fases de vuelo de las aeronaves bajo las cuales tiene responsabilidad.

Referencias

- Abarza, J., y Katz, J. (2002). *Los derechos de propiedad intelectual en el mundo de la OMC*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Alzate, E. J., Montes Ocampo, J. W., y Silva Ortega, C. A. (2007). Medidores de deformación por resistencia: galgas extensiométricas. *Scietia Et Technica*. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/849/84934002/>
- Colciencias. (2014). *Acta de proyectos a financiar. Convocatoria n.º 666-2014*, (p. 1). Bogotá.
- Departamento Nacional de Planeación. (14 de julio de 2008). *Documento CONPES 3533*. Bogotá D. C., Colombia. Recuperado de <https://www.ica.gov.co/getattachment/a1be26c2-af09-4635-b885-c3fcea7291e4/2008cp3533.aspx>
- Díaz, Á. (2008). *América Latina y el Caribe: la propiedad intelectual después de los tratados de libre comercio*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.



- Fuerza Aérea Colombiana. (2015). *Modelo de Investigación del Sistema Educativo de la Fuerza Aérea Colombiana - MOINV*. Bogotá.
- González, J. A., & Monterrubio, J. (2010). *Desarrollo de un programa de mantenimiento para el helicóptero UH-60L*. México D. F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Headquarters, Department of the Army. (2013). *Technical Manual TM-1520-237-23-1*.
- Hernández, D. (2015). AH-60L “Arpía” IV: el halcón que se convirtió en águila. *Air and Space Power Journal en Español*, 57- 62.
- Inter-telco SAS. (2015). *Proyecto esfuerzos - Manual del usuario*. Rionegro.
- Inter-telco SAS. (2015). *Proyecto esfuerzos - Presentación avance software*. Rionegro.
- Johnson, S. B., Gormley, T. J., Kessler, S. S., Mott, C. D., Patterson-Hine, A., Reichard, K. M., & Scandura Jr., P. A. (2011). *System Health Management*. Chennai: John Wiley & Sons, Ltd.
- Megson, T. (2005). *Structural and Stress Analysis*. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Murray, W. M., & Miller, W. R. (1992). *The Bonded Electrical Resistance Strain Gage*. New York: Oxford University Press.
- Nawrocki, W. (2005). *Measurement Systems and Sensors*. Artech House. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>
- OMPI. (s.f.). Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. Recuperado de http://www.wipo.int/edocs/pubdocs/es/intproperty/450/wipo_pub_450.pdf
- Reddick Jr, H. K. (s.f.). *Safe-life and Damage Tolerant Desing Approache for Helicopter Structures*. Ft. Eustis: US Army Research and Technology Laboratories - AVRADCOM.
- Salazar, J. E. (2007). *Resistencia de materiales básica para estudiantes de ingeniería*. Manizales: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia.
- SIC. (11 de octubre de 2017). *Patentes*. Recuperado de <http://www.sic.gov.co/patentes>
- Sikorsky Aircraft Corporation. (1997). *Aircraft Specification for the UH-60L Black Hawk Helicopter*. Sikorsky.
- Wilson, J. (2005). *Sensor Technology Handbook*. Burlington: Elsevier.
- Wolf, S., y Smith, R. (1992). *Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio*. México D. F.: Pearson Educación.



Primeros estudios para la implementación de un generador eólico para una base temporal de Colombia en la Antártida

César Jiménez Lozano¹⁵

Resumen

Este artículo es el resultado de la primera expedición antártica de la Fuerza Aérea Colombiana, realizada en diciembre del año 2015, donde a través del proyecto enfocado en energías renovables se dio luz verde por parte de la Comisión Colombiana del Océano, como patrocinadores, de esta manera se inicia la investigación a través de un estudio de campo sobre la posible implementación de un generador eólico para la producción de electricidad, con miras a establecer la futura base de Colombia en el continente blanco y contribuir con la agenda científica Antártica Colombiana 2014-2035 del país.

Palabras clave: eólica, generador, energía renovable, panel solar, aeroespacial, sostenibilidad, energía limpia.

Introducción

El continente antártico asemeja una mirada tranquila, sin formalismos, en un ambiente de respeto con lugares excepcionales y una belleza natural que contrasta con su clima extremo; es este un lugar donde se pone en evidencia la emoción como investigador, al observar y tomar conciencia por el cuidado del medio ambiente. Tema que a diario se torna real durante la experiencia y la investigación.

En la búsqueda de nuevos caminos y soluciones para generar energía desde fuentes limpias y explotar los recursos del planeta de una manera razonable, ecológica y rentable, se dio inicio a la primera visita al continente antártico en el año 2015; comenzó la investigación teniendo en cuenta los diversos tipos de aerogeneradores, pero como era de esperarse, dado el poco desarrollo y estudios en este campo, se encontró que todos los prototipos tenían algo en común, demasiado costosos e ineficientes al momento de generar la energía necesaria para el proyecto, haciendo que su implementación no fuese viable económicamente. Hoy por hoy, la mayoría de inconvenientes han sido superados gracias a incentivos en investigación y desarrollo.

Se tomó la decisión de instalar un aerogenerador eólico, guiados en el modelo de instalación de la base de Marambio de la fuerza Aérea de Argentina, se desarrollaron varias fases de investigación y análisis, donde se obtuvieron resultados meteorológicos con respecto a espacios, distancias, áreas, equipos, plantas y alumbrado para determinar el consumo energético.

¹⁵ Grupo de Investigación CIPAER. Escuela de Postgrados Fuerza Aérea Colombiana. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: st.jimenez.fac@gmail.com



En la segunda misión, se transportó el generador eólico, se revisó el área para la instalación; siempre con el apoyo de los compañeros de la Fuerza Aérea de Argentina, quienes prestaron todo el sostén logístico.

Descripción del problema

Se realizó diariamente trabajo de campo, se verificaron los elementos de consumo eléctrico y dotación eléctrica, se encontró que la base de Marambio emplea tres plantas marca Caterpillar, cada una produce 410 kW, se emplean de manera alterna y sincronizada y son alimentadas por combustible, gasoil o combustible antártico, consumiendo 50 litros de combustible por hora de operación, el costo por barril de 55 galones, incluyendo gastos logísticos, oscila sobre los USD\$ 2.700, haciendo que la operación con combustibles fósiles sea costosa.

Se estudiaron las pérdidas de energía que tiene la base Marambio, como los utilizados para descongelar las cañerías de aguas negras, las cuales están aisladas con cajas de empaques de tetra pack, recubiertas con resistencias eléctricas (figura 1).

Se observó que se emplea energía para calentar el tanque de aguas negras para mantener vivas las bacterias. Este proceso se puede minimizar y disminuir así el consumo de energía, a través de un aislamiento en poliuretano alrededor del tanque, efecto que optimiza el consumo de energía.

El tratado antártico no permite que se contamine el territorio, por lo cual se hace necesaria la implementación de energías limpias, que contribuyan al cuidado del ecosistema.

En la búsqueda de una solución sustentable a la problemática de la demanda energética para la calefacción de todas las áreas de la base, los equipos, plantas, computadores y el alumbrado, así como disminuir la contaminación en las actividades industriales, el consumo de combustibles para la incineración de los residuos orgánicos, el consumo de biodiesel y gasoil se hace indispensable la instalación de un generador eólico que almacene suficiente energía limpia.

Desde esta perspectiva, sin impactar el medio ambiente y dentro de los parámetros económicos, se puede hacer realidad el proyecto descrito en el presente artículo, con la instalación del generador eólico en la base de la Antártida.



Figura 1. Cañería de aguas negras



Fuente: Ct. Jiménez Lozano César, FAC

Formulación del problema

¿Cómo generar energía en la Antártida que sea amigable con el medio ambiente? Es un interrogante de gran importancia, ya que una de las metas del Gobierno de Colombia para el año 2025, es establecer una estación científica temporal, y en el 2035, implementar una estación permanente, siendo esta base fundamental para proyectos de investigación e innovación tecnológica que se pretendan desarrollar en la Antártica, para beneficio de la humanidad, nuestras instituciones y nuestro país.

Esta investigación en función del desarrollo de Colombia trae muchos beneficios, ya hay muchos lugares aislados de la geografía donde no llegan las redes de electricidad. Con el desarrollo de este proyecto, la Fuerza Aérea adquiere conocimiento en este campo para lograr apoyar las poblaciones más vulnerables y alejadas del país, contribuyendo de esta forma a la preservación del medio ambiente.

Objetivos

General

Instalar un aerogenerador eólico para suministrar energía eléctrica en la futura base colombiana en el continente antártico.



Específicos

- Identificar y analizar las fuentes de viento, los consumos de energía, las distancias y el sitio de ubicación del generador eólico en la Antártida.
- Analizar e implementar el diseño de un generador eólico de acuerdo con las fuentes de viento registradas.
- Investigar y analizar el impacto de las bajas temperaturas en la turbina eólica, para lograr aislar la temperatura, proteger la turbina eólica y mantener eficiencia y la seguridad.
- Construir un prototipo.

Marco teórico

Los altos costes de generación de electricidad a partir del viento se redujeron considerablemente (50 %) en 1981 con el desarrollo de un aerogenerador de 55 kW. Las organizaciones ecológicas consideran la energía eólica una de las fuentes de energía más económicas, sin incurrir en otros costes externos ocasionados por los daños del medio ambiente (Ammonit, s.f.)

Los aerogeneradores modernos generan una parte importante de la energía eléctrica mundial. Alemania, USA y España son los tres países con más energía eólica instalada del mundo (Ammonit, s.f.).

Los parques eólicos construidos en tierra suponen una fuente de energía cada vez más competitiva, incluso más barata. En muchas regiones se ha comparado con otras fuentes de energía convencionales, obteniendo resultados positivos. Pequeñas instalaciones eólicas pueden, por ejemplo, proporcionar electricidad en regiones aisladas con difícil acceso a la red eléctrica (Repaveca, 2014).

El viento es una de las fuentes de energía más aprovechada desde la antigüedad por la humanidad.

Con la primera crisis del petróleo en los años 70, sobre todo a partir del surgimiento de movimientos de Europa contra la energía nuclear en los años 80, todo debido a los riesgos y desastres como el de Chernóbil, se despertó el interés de nuevos métodos de obtención de energías limpias y amigables con el medio ambiente, como son las energías renovables. (Ecologica Constructores, s.f.).

Gracias a los avances tecnológicos, la sofisticación y la economía de escala, el coste de la energía solar fotovoltaica se ha reducido de forma constante, aumentando la eficiencia y su coste medio de generación eléctrica. Siendo competitivo con las energías no renovables en un creciente número de regiones geográficas, alcanzando la paridad de red. Otras tecnologías como la energía solar o termoelectrica están reduciendo sus costes también de forma considerable (Ambientes y Soluciones, 2017).



Una de las primeras actividades realizadas, fue la instalación de una estación meteorológica portátil para analizar la intensidad de los vientos y registrar las bajas temperaturas, iniciando con un estudio básico del comportamiento de estas variables y decidir la viabilidad de implementar la energía eólica.

Metodología

El método empleado para el presente estudio se deriva de estudios de campo realizados por la Fuerza Aérea Argentina y su departamento de energías renovables, basados en las condiciones extremas y eficiencia eléctrica del área, para la instalación de un generador eólico.

El diseño del estudio empleado fue el método experimental, donde se utilizó una técnica práctica con construcción simplificada, para lograr cumplir con la generación de vatios requeridos para la supervivencia del personal de la base temporal; se realizaron pruebas de generación, pérdidas por temperatura y demás parámetros para corroborar si el diseño implementado con generador eólico cumple con las expectativas del proyecto.

El proyecto se desarrolló en varias fases de campo, así:

1. En la primera fase se hizo recolección de datos e información de consumo energético de la Base Antártica de Marambio.
2. En la segunda fase la recolección de datos de meteorología.
3. En la tercera fase con la Estación Portátil de Meteorología (Easy Weather) se evalúan las condiciones de viento y temperatura, fundamentales para el diseño de la turbina eólica durante los días de campaña antártica.
4. En la cuarta fase se hizo medición de distancias y espacios.

Durante un periodo de 15 días se hicieron los siguientes análisis:

- Se analizaron los parámetros meteorológicos y se obtuvo como resultado temperaturas máximas de -21°C
- Se analizó la humedad obteniéndose una medición alrededor del 90 % debido a que casi siempre está nevando (figura 2).



Figura 2. Estación meteorológica colombiana congelada por nevada



Fuente. Ct. Jiménez Lozano Cesar (FAC).

Instrumentos de recolección de datos

Estación Portátil de Meteorología (Easy Weather)

Evalúa las condiciones de viento y temperatura, fundamentales para el diseño del aerogenerador eólico durante los días de campaña antártica.

Análisis de resultados

Durante el periodo de análisis de los parámetros meteorológicos se obtuvo como resultado temperaturas máximas de 21 °C., obtenidos durante 15 días.

Se analizó durante 15 días la velocidad del viento, se obtuvo como resultado una corriente máxima de 65 km por hora.

Durante la medición del viento hubo un intervalo muerto, ya que la estación meteorológica se congeló debido a la baja temperatura ocasionada por una ventisca, esto ocasionó que el sensor de medición de velocidad del viento se desconectara debido a las fuertes ráfagas de viento.

Se realizó la verificación de elementos de dotación con consumo de eléctrico, teniendo en cuenta que la base de Marambio, emplean tres plantas marca Caterpillar que produce cada una 410 kW y se emplean de manera alterna y sincronizada, alimentadas por combustible, gasoil o combustible antártico, consumiendo 50 litros de combustible por hora (figura 3).



Figura 3. Grupo electrógeno CAT, planta eléctrica Usina base Marambio



Fuente. Ct. Jiménez Lozano César (FAC).

El agua que se emplea para el consumo se extrae de una laguna, mediante una bomba de agua que va conectada a un tanque, el cual es arrastrado por un tractor, el agua del lago es retenida por una barrera de tierra y se emplean tubos sellados con combustible en su parte interior, cuando el combustible se enfría en la parte superior este recorre hacia la parte inferior y mantiene congeladas las paredes del lago.

En invierno se emplea gas para derretir nieve y para el consumo regular, incrementándose el consumo de gas o energía.

Para la construcción de cualquier estructura, es necesario elevarla 1,20 metros sobre el suelo, ya que cuando hay ventiscas la nieve pasa a través de la estructura, es decir por encima y por debajo, sin formar lo que se denomina sombra de nieve, además es muy importante resaltar que no se emplea concreto para fundir bases, se utiliza agua y tierra, ya que la característica del suelo es permafrost, es decir, una mezcla de tierra con hielo la cual es blanda en el verano, y en el invierno es tan dura que es necesario taladrar para abrir un agujero.

Conclusiones y recomendaciones

Es de gran importancia tener todos los detalles posibles de consumos energéticos antes descritos para la implementación de una base temporal y así poder optimizar el consumo eléctrico, logrando ser 100 % autosostenible con energías alternativas, y así cuidar el medio ambiente antártico. Por consiguiente, se concluye que:

- Diseñar y construir un generador eólico de 3000 vatios, previamente al viaje de la expedición con los elementos eléctricos y electrónicos básicos para implementarlo en la Antártida, como prototipo de pruebas iniciales, así como facilitar la logística del envío del mismo.



- El generador eólico es la mejor alternativa para generación de energía durante los 365 días de año, se recomienda usar cañerías aisladas con poliuretano para no emplear electricidad para calentarla sino un material aislante.

Se requiere de un taladro neumático para lograr romper el permafrost y realizar el anclaje del generador eólico al suelo.

Para la próxima campaña antártica, es de vital importancia fortalecer los lazos de hermandad y cooperación científica con la Fuerza Aérea Argentina, y lograr realizar la continuidad en el trabajo que se adelanta, además, es de resaltar la cooperación que recibimos del departamento de Energías Renovables.

- Se requiere de un buen entrenamiento y dotación en las actividades antárticas.
- Posicionamiento de un asentamiento transitorio de verano (figura 4).
- Instalación de una estación meteorológica para realización de mapa de vientos.
- Estudio de impacto ambiental para preinstalación asentamiento temporal y finalización de la campaña en un estudio de aguas y aire, para cuantificar el impacto de la huella de carbono.
- Fortalecer la logística antártica a través del programa Logístico Aeronáutico de la FAC.

Figura 4. Estructura tipo domo para nieve portátil



Fuente. Origamitek S.A.S Colombia.

La industria y tecnología colombiana es uno de los principales motivos para participar en la Antártida durante los años venideros, y buscar el crecimiento y desarrollo para Colombia, siendo la Antártida un motor de emprendimiento investigativo. Esta es la gran oportunidad que tiene las Fuerzas Militares de Colombia para proyectarse en su visión.



Una Fuerza Aérea Colombiana desarrollada tecnológicamente, con el mejor talento humano y afianzado en sus valores, para liderar el poder aeroespacial y ser decisiva en la defensa de la nación.

Referencias

- Agencias. (25 de febrero de 2009). *El deshielo de los polos afecta a la vida humana, animal y vegetal*. EcoDiario.es. Recuperado de <http://ecodiario.eleconomista.es/medio-ambiente/noticias/1059765/02/09/La-nieve-y-el-hielo-disminuyen-en-ambos-polos-por-el-cambio-climatico.html>
- Ambientes y Soluciones. (2017). *KIT de energía solar 320 watts hora x día prediseñado*. Recuperado de https://www.ambientesoluciones.com/sitio/productos_mo.php?it=1413
- Ammonit. (s.f.). *¿Qué es la energía eólica?* Recuperado de <http://www.ammonit.com/es/informacion-eolica/energia-eolica>
- Armada Nacional de Colombia. (s.f.). *Programa Antártico Colombiano*. Recuperado de www.armada.mil.co
- Comisión Colombiana del Océano. (2016). *Programa Antártico Colombiano*. Recuperado de www.cco.gov.co
- Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación. (Enero de 2016). *Programa Antártico Colombiano*. Colciencias. Recuperado de www.colciencias.gov.co
- Departamento de Energías Renovables FAA. (2016). *Generador eólico FAA*. Recuperado de <http://energiasrenovablesantartida.faa.mil.ar/index.php/Home/agradecimientos>
- Ecologica Constructores. (s.f.). *¿Qué es un sistema solar fotovoltaico?* Recuperado de <http://ecologicaconstructores.com/index.php/eco-blog/101-que-es-un-sistema-solar-fotovoltaico>
- Erenovable. (21 de julio de 2015). *Cómo funciona un aerogenerador o turbina eólica*. Erenovable.com. Recuperado de <https://erenovable.com/como-funciona-un-aerogenerador-o-turbina-eolica/>
- Ministerio de Relaciones Exteriores. (Enero de 2016). *Programa Antártico Colombiano*. Recuperado de www.cancilleria.gov.co
- National Geographic. (5 de septiembre de 2010). *Energía solar*. National Geographic. Recuperado de <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/energia-solar>
- Prensa Antártica. (8 de enero de 2018). *Casi 130 mil habitantes serán beneficiados en Magallanes con futuro parque eólico de ENAP*. Prensa Antártica. Recuperado de <https://prensaantartica.com/2018/01/08/casi-130-mil-habitantes-seran-beneficiados-en-magallanes-con-futuro-parque-eolico-de-enap/>



Renovables Verdes. (30 de noviembre de 2010). *La Antártida y las energías renovables*. Recuperado de <https://www.renovablesverdes.com/la-antartida-y-las-energias-renovables/>

Repaveca. (9 de abril de 2014). *Energía eólica, ¿qué es?* Repaveca. Recuperado de <http://www.repaveca.com.ve/index.php/conciencia/item/671-energia-eolica-que-es>

Tanaka, M. (5 de febrero de 2010). *¿Cómo funciona un generador eólico?* Sustentador. Recuperado de <http://www.sustentador.com/blog-es/2010/02/como-funciona-un-generador-eolico/>



VIII Congreso Universidad Militar Nueva Granada
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA APLICADA**



III Congreso Escuela de Postgrados FAC
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA AERONÁUTICA**



CAPÍTULO IV. Track de investigación Ingeniería Industrial



Generación de estrategias orientadas al uso del servicio al cliente como ventaja competitiva

Ana María Beltrán Zapata¹⁶

Resumen

Las empresas hoy en día se enfrentan a un mercado en constante crecimiento con una oferta variada de productos, lo cual trae como resultado un aumento en la competitividad, es así como surge la necesidad de dar un valor agregado que permita crear relaciones duraderas con los clientes. Muchas organizaciones empresariales olvidan la influencia que puede llegar a tener la satisfacción de un cliente respecto al número de ventas, por lo tanto, el presente proyecto busca generar algunas estrategias que puedan llegar a mejorar el servicio al cliente del sector de la industria textil, teniendo en cuenta las posibles falencias que se presentan comúnmente y los tipos de clientes a los cuales se enfrenta el mercado.

Para llegar a lo establecido se realizará un análisis DOFA para poder idear estrategias organizacionales enfocadas en la satisfacción del cliente, tal que se puedan mejorar y modernizar los actuales servicios de atención para alcanzar el éxito comercial.

Palabras clave: análisis DOFA, servicio al cliente, ventaja competitiva y fidelización de los clientes.

Introducción

El sector de la moda es un mercado que en los últimos años ha alcanzado un gran auge, lo cual ha producido el aumento en la oferta de productos competitivos orientados a satisfacer las necesidades de un mismo grupo de clientes, es así como surge la necesidad de crear relaciones duraderas con los clientes los cuales cumplen el papel más fundamental en el proceso de venta. De este modo el presente trabajo se enfoca en el mercado de la moda, orientado a la oferta de indumentaria y accesorios para el mercado femenino de jóvenes adultas entre los 18 y 20 años, para desarrollar estrategias que puedan mejorar los servicios de atención al cliente del sector retail enfocado en las empresas dedicadas a la comercialización, teniendo en cuenta algunos de los distintos factores que influyen en la relación con los compradores, para favorecer el alcance del éxito empresarial y el aumento de ingresos.

Dado a que muchas organizaciones empresariales olvidan la influencia que puede llegar a tener una venta exitosa, en la cual el cliente logra alcanzar el mayor grado de gratificación en el número de ventas, se busca como resultado mejorar el servicio al cliente, teniendo en cuenta las posibles falencias que se presentan comúnmente y los tipos de clientes a los cuales se enfrenta el mercado.

¹⁶ Universidad Militar Nueva Granada. Grupo PIT - Producción, Innovación y Tecnología. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: u2903094@unimilitar.edu.co



El presente trabajo se enfoca en el servicio al cliente como una ventaja competitiva, tal cual como lo expresan Moliner, Fayos y Ruiz (2002), en el cual la citan a Rigby (2002) estableciendo que el marketing permite destacar el valor de la relación entre empresas y clientes, considerando que los consumidores se consideran cada vez menos fieles y con un mayor nivel de exigencia, lo que lleva a considerar que los clientes que mantienen vínculos con sus proveedores, se pueden considerar un activo valioso, teniendo en cuenta el valor de sus comprar y su frecuencia de compra.

El brindar un servicio integral de atención al cliente puede llegar a ser un arma poderosa y económica, tal cual como lo establece John Tshohl, gurú del servicio al cliente, en muchas de sus obras tales como “Alcanzando la excelencia mediante el servicio a los clientes” del año 1994 o “Servicio al cliente: El arma secreta de la empresa que alcanza la excelencia” de 2007. De este modo para mejorar la calidad del servicio es necesario realizar dos pasos fundamentales, el primero consiste en una consulta que permita contextualizar la situación del sector y la segunda es la elaboración de la matriz DOFA para poder idear estrategias organizacionales enfocadas en la satisfacción del cliente, para mejorar y modernizar los actuales servicios de atención para alcanzar el éxito comercial. (Olarte Pascual, Sierra Murillo, & Mosquera de la Fuente, 2005)

Referente teórico

Sector de la moda asociado al servicio al cliente

La atención al cliente constituye una de las bases para el éxito de una empresa, este servicio trabaja bajo la siguiente filosofía: “El cliente debe ser tratado como desea que lo traten”, esto nos dice que todas las actividades del proceso productivo deben ir orientadas a la satisfacción del cliente. Para llegar a ofrecer un trato de calidad se deben tener en cuenta los siguientes factores que propone el Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación (2013):

- Elementos tangibles: como las instalaciones y los equipos de la empresa, la presentación del personal, los materiales de comunicación y la exhibición de los productos.
- Cumplimiento: implica desarrollar el servicio prometido oportunamente, es decir, lo que el vendedor ofrece en palabras lo cumpla con la entrega del producto o servicio.
- Disposición: es ayudar a los clientes a escoger el producto, proporcionándoles una asesoría para que se sientan satisfechos.
- Cualidades del personal: los vendedores deben demostrar que son competentes en su trabajo y capaces de inspirar confianza.
- Empatía: los vendedores deben conocer al cliente, entender sus necesidades y mantener con ellos una comunicación positiva y permanente.

Además de lo mencionado anteriormente, si se enfoca el servicio al cliente en un sector en específico como el de la moda, se debe tener en cuenta la gestión del establecimiento en el cual



se va a ofrecer el producto. Para llevar a cabo lo anterior, manejar detalles como la decoración y un ambiente propicio para el cliente puede ser de ayuda si se habla de calidad en el servicio. (Roca Acevedo , 2010)

La industria textil

La industria textil ha logrado posicionarse como una de las más grandes fuentes de ingreso a nivel mundial, lo cual le ha permitido hacerse un puesto fundamental a nivel de la economía global. De este modo a nivel nacional, en Colombia el sector textil ha logrado generar aportes significativos en la economía nacional, en especial por la producción, la internacionalización y el desarrollo económico del país. En los últimos años se ha evidenciado el buen desempeño de esta industria, que se ha ido caracterizando por sus mejoras en innovación y especialización, destacando la alta calidad de la costura nacional; además de la eficiencia y rapidez en los procesos de producción, despacho y entrega de mercancías (Campos 2014).

Sector retail

Para hablar del sector retail es necesario conocer en sí a qué se refiere la palabra “retail”, este es un término inglés que hace referencia al comercio al por menor y que según el artículo “El crecimiento de retail en Colombia” el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), describe al grupo de grandes almacenes que dirigen sus ventas al consumidor final y que funcionan bajo el esquema de tiendas por departamento, en este grupo entra el reciente y en ascenso comercio electrónico o retail online (El Nuevo Siglo, 2014).

Matriz DOFA

Analizar las variables internas y externas que impactan una organización, suele ser un proceso empleado para la elaboración de un plan estratégico, dicha metodología recibe el nombre de FODA, DOFA o SWOT (en inglés). Según un artículo publicado por AGN (2011):

El FODA matemático es una metodología que aporta rigor científico al análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas.

Las empresas no utilizan rigor científico para hacer el análisis de su empresa, y en una forma simplista, sin ningún valor y totalmente subjetiva, se define el futuro de una organización, señala el creador de esta metodología, el argentino Mario Héctor Vogel, director del Club Tablero de Comando. (Vogel, 2015)



Figura 1. Esquema general de DOFA matematizada

Debilidades		Peso (suma 100)	Valoración I1 (Nosotros) [de 0 a 3]	P x I1 (Nosotros)
1	Establecer comunicación comercial	45	2	90
2	Identificar las necesidades de los clientes	20	1	20
3	Comisión como incentivo de trabajo	5	2	10
4	División de las obligaciones	10	0	0
5	Líneas de atención al cliente	20	0	0
6				0
7				0
8				0
9				0
10				0
Suma		100		120

Fortalezas		Peso (suma 100)	Valoración I1 (Nosotros) [de 0 a 3]	P x I1 (Nosotros)
1	Ambientación del establecimiento	40	3	120
2	Presentación personal como canal de comunicación	20	2	40
3	Organización del inventario	20	2	40
4	vendedores con conocimiento de los productos	20	2	40
5				0
6				0
7				0
8				0
9				0
10				0
Suma		100		240

Amenazas		Peso (suma 100)	Valoración I1 (Nosotros) [de 0 a 3]	P x I1 (Nosotros)
1	Ubicación en zonas comerciales	10	0	0
2	Clientes inconformes	40	2	80
3	Temporadas	20	3	60
4	Convicción de los clientes	30	3	90
5				0
6				0
7				0
8				0
9				0
10				0
Suma		100		230

Oportunidades		Peso (suma 100)	Valoración I1 (Nosotros) [de 0 a 3]	P x I1 (Nosotros)
1	Cliente que busca información	10	3	30
2	Comportamiento variable del cliente	10	2	20
3	Estimulación de las necesidades	45	3	135
4	clientes conectados con las TIC	35	2	70
5				0
6				0
7				0
8				0
9				0
10				0
Suma		100		255

Fuente. elaboración propia

Una venta exitosa

El punto de venta además de ser considerado como un espacio físico, también es un espacio que propicie el intercambio de información, de esta forma el establecimiento comercial es una oportunidad para que el fabricante interactúe con el consumidor para impulsar las ventas. Es por este motivo que Martínez (2005) establece que para el posicionamiento de una empresa es necesario tener en cuenta una serie de planteamientos basados en la comunicación integrada al marketing, donde la elección de un buen mensaje permite otorgar un valor agregado del producto frente a la competencia.

Etapas de una venta exitosa.

- Estar preparado para la venta.
- Entrada y recibimiento.
- Identificación de las necesidades de la clientela.
- Oferta del producto más adecuado.
- Invitar a que el producto sea probado.
- Seguimiento de la venta.

Diálogo con las personas

Del olmo y Fondevila Gascón, en su libro de *Estrategias de marketing*, citan a Chías quien afirma que el marketing no es imposición, sino que es seducción, pero teniendo en cuenta que los consumidores están saturados de publicidad constantemente se vuelve necesario pasar a un



marketing experiencial, donde las experiencias del cliente vienen a relucir como una estrategia fundamental (Del Olmo & Fondevila Gascón, 2014). De esta manera las oportunidades para influir en el consumidor están presentes durante la compra, después de esta y la experiencia que determina la satisfacción. Este tipo de marketing trabaja bajo la filosofía de que el cliente se mueve por impulsos emocionales donde estos manifiestan sus deseos de ser atendidos.

Métodos y materiales

Herramienta DOFA matematizada en Excel

Aplicativo que funciona con algoritmos y métodos numéricos, el cual permite determinar las variables internas y externas más relevantes.

Identificación de variables internas y externas

Se requiere de un conocimiento teórico y experimental para determinar los factores que van a ser las variables de la DOFA.

Uso de la DOFA matemática

- *Subvariables*

Al tener los factores generales de la DOFA se generan 10 subvariables para cada una de las clasificaciones de variables: debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas.

- *Calificación*

Valorar cada uno de las subvariables de 0 a 3, de modo que a mayor número, mejor es la condición de dicha subvariable.

- *Prueba*

Correr el aplicativo para que se realice el respectivo análisis numérico.

- *Interpretar el gráfico.*

Generar estrategias

Análisis de resultados parciales

Se establecieron los factores para cada variable que compone la DOFA, teniendo en cuenta el conocimiento teórico y experiencias obtenidas como cliente, en este caso las variables internas se vieron fuertemente influenciadas por aspectos como lo son el alcance de una venta exitosa y la calidad del ambiente que se propicia al cliente durante el momento de compra. Por otro lado,



respecto a las variables externas, se tuvo en cuenta el comportamiento regular de los clientes y los factores que influyen en la toma de sus decisiones. (AMÉZQUITA G & PATIÑO M, 2011)

A continuación, se presentan los factores determinados para cada variable:

Tabla 1. Variables de las fortalezas

Fortalezas		Peso (Suma 100)	Valoración I1 (Nosotros) [de 0 a 3]	P x I1 (Nosotros)
1	Ambientación del establecimiento	15	3	45
2	Presentación personal	10	2	20
3	Organización del inventario	15	1	15
4	Conocimiento de los productos	8	2	16
5	Decoración del establecimiento	8	3	24
6	Manejo de redes sociales	4	2	8
7	Promoción de la marca	10	2	20
8	Aceptación por parte del mercado	10	2	20
9	Edad de los vendedores	7	1	7
10	Experiencia que ofrece el establecimiento	13	1	13
	Suma	100		188

Fuente: elaboración propia

Fortalezas

- Las instalaciones cuentan con una decoración y un ambiente favorecedor para el cliente, ya que está acorde con el tipo de productos que se ofrecen y con el mercado con el cual se está trabajando.
- La presentación del personal del establecimiento está orientada a exhibir parte de los productos ofrecidos, haciendo uso de este como otro canal para llegar al cliente.
- La indumentaria y los accesorios se encuentran organizados en el establecimiento de manera clasificada, de este modo la búsqueda del cliente se facilita.
- Los vendedores tienen claridad respecto a la información relevante acerca de los productos que se ofrecen, es decir, se encuentran en capacidad de hablar descuentos, tallas y demás.
- Los trabajadores del establecimiento tienden a pertenecer al mismo grupo de clientes, en este caso adultos jóvenes.
- Al ser tiendas con un gran impacto en la población de jóvenes adultos, hay un manejo muy favorable respecto al uso de las redes sociales con el fin de promocionar la marca y los artículos en general.



Tabla 2. Variables de las debilidades

Debilidades		Peso (Suma 100)	Valoración I1 (Nosotros) [de 0 a 3]	P x I1 (Nosotros)
1	Establecer comunciación comercial	25	1	25
2	Identificar las necesidades de los clientes	20	1	20
3	Comisión como incentivo de trabajo	5	2	10
4	División de las obligaciones	5	0	0
5	Líneas de atención al cliente	6	0	0
6	Conocimiento d elos productos	10	1	10
7	Selección de trabajadores calificados	10	2	20
8	Condición física de los vendedores	3	2	6
9	Competitividad en el ambiente laboral	6	0	0
10	Trato a los clientes	10	1	10
Suma		100		101

Fuente: elaboración propia.

Debilidades

- Dificultad para establecer una buena comunicación comercial que permita identificar cuáles son las necesidades de los clientes.
- La invitación a que el producto sea probado en ocasiones está condicionada por el tipo de comisión que reciben los vendedores, de esta forma se tiende a presionar al cliente para realizar una compra o, si en dado caso la comisión no está incluida como algo adicional, los vendedores descuidan al cliente al no tener incentivos. Por otro lado, se genera tensión en el ambiente laboral, ya que se genera una competitividad entre los vendedores.
- En la mayoría de las situaciones, los acopiadores realizan a su vez la labor de vendedores, lo cual genera un desgasto físico que por consecuencia disminuye la calidad el servicio de atención.
- No tener el adecuado medio de comunicación entre el cliente y la empresa, en el cual este primero pueda dar a conocer su inconformidad con respecto a la atención recibida.
- Dejar de lado la importancia que hay en el proceso de escogencia del equipo en cargado de manejar el área de servicio, es decir, el establecimiento de ropa. En este caso es de importancia que cada miembro del área de ventas se encuentra capacitado.



Tabla 3. Variables de las oportunidades

Oportunidades		Peso (Suma 100)	Valoración I1 (Nosotros) [de 0 a 3]	P x I1 (Nosotros)
1	Cliente que busca información	10	3	30
2	Comportamiento variable del cliente	10	2	20
3	Estimulación de las necesidades	15	3	45
4	Clientes conectados en redes sociales	6	2	12
5	Generar interés en los clientes	7	1	7
6	Capacidad de generar necesidades	20	1	20
7	Vulnerabilidad del mercado hacia lo atractivo	8	2	16
8	Mantener contacto con los clientes	4	2	8
9	Posibilidad de generar experiencias	5	2	10
10	Clientes que buscan más calidad	15	1	15
Suma		100		183

Fuente. elaboración propia

Oportunidades

- La percepción de los clientes está condicionada por el interés que presentan respecto a un artículo en especial, por lo tanto, buscarán la información deseada de manera activa o pasiva. (Cuesta Numpaque, 2013)
- El aprendizaje como factor fundamental que influencia en la decisión de realizar compras, ya que el comportamiento del consumidor es variable respecto a las experiencias que este vaya adquiriendo. (MolinerVelázquez, Fayos-Gardó, & Ruiz Molina, 2015)
- El cliente es vulnerable respecto a la generación de una necesidad, por lo tanto, esta última puede ser potencializada de manera externa, teniendo en cuenta que el mercado se ve estimulado por aquello que se percibe como atractivo.
- Con el mercado objetivo se puede establecer y mantener el contacto con mayor facilidad, gracias a la fuerte interacción de estos con las TIC.
- Los clientes además de buscar un producto de calidad, también le dan un gran valor de importancia a las buenas experiencias. (Vélez, 2013)



Tabla 4. Variables de las amenazas

Amenazas		Peso (Suma 100)	Valoración I1 (Nosotros) [de 0 a 3]	P x I1 (Nosotros)
1	Ubicación en zonas comerciales	10	0	0
2	Clientes inconformes	15	2	30
3	Temporadas	10	2	20
4	Convicción clientes	5	1	5
5	Nivel de competencia en la zona	6	2	12
6	Disponibilidad de productos	10	2	20
7	Confiabilidad en el producto	10	2	20
8	Disponibilidad de medios de atención	15	0	0
9	Criterio de selección de los clientes	9	2	18
10	Opinión de los clientes	10	1	10
Suma		100		135

Fuente: elaboración propia

Amenazas

- El establecimiento comúnmente se encuentra ubicado en zonas comerciales, por lo tanto, la fidelidad del comprador se pone en riesgo al tener diversas contraofertas por parte de la competencia.
- El cliente desconforme se caracteriza por comunicar su inconformidad respecto a un servicio tomado, de este modo da a conocer su insatisfacción a terceros y migra para recibir el servicio de otras compañías. (Martinez, 2005)
- El flujo de ventas no es regular, ya que este tiende a variar respecto a ciertas temporadas, de este modo el ritmo diario de ventas e incluso la cantidad disponible de elementos va a estar condicionado por dicho suceso.
- La convicción de los clientes es un factor que influye en la creencia que se tiene respecto a una marca, de este modo, en la mayoría de los casos, las compras ya se tienen preestablecidas e invariables, dado a que la decisión es tomada con base a un criterio subjetivo. (Seoana Balado, 2005)
- La mayor parte de la competencia tiene únicamente un servicio de atención al cliente posventa, que se enfoca en devolución de artículos defectuosos o simplemente la gestión de PQR.

La tabla presentada a continuación muestra el esquema para asignar la puntuación a cada variable.



Tabla 5. Tabla de clasificación para valorar las variables

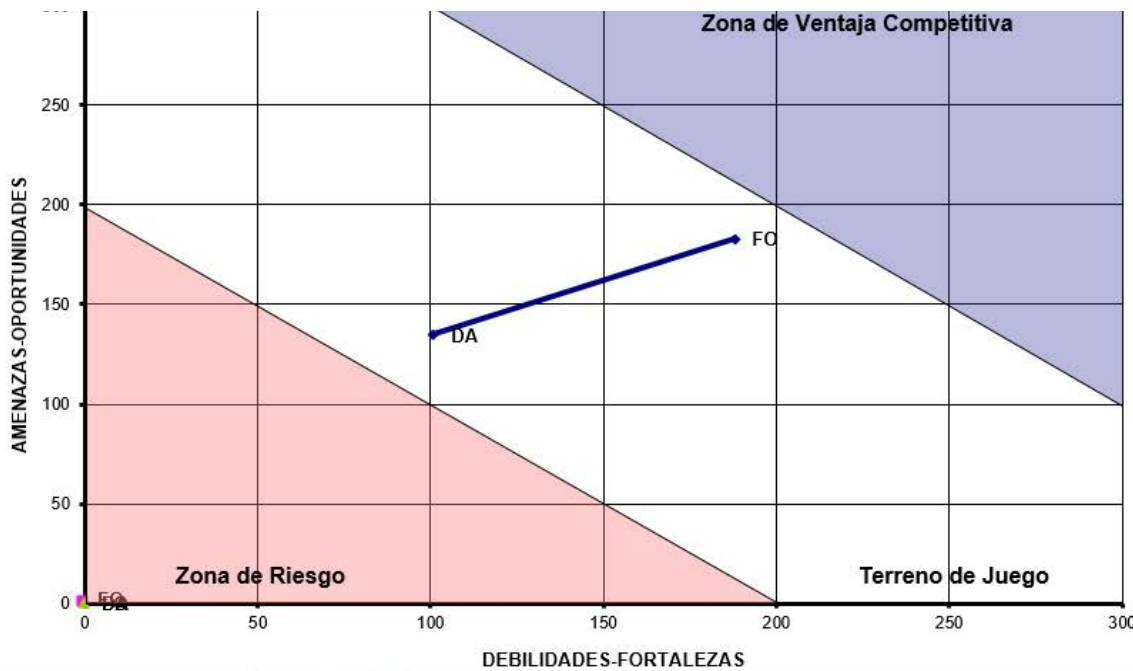
TABLA DE CLASIFICACIÓN	
3	Ideal - Mejor Imposible - Excelente Impresión - Excede las expectativas
2	Por encima de la media - Mejor que la mayoría - No es habitual
1	En la media - Suficiente - Expectativa mejorable
0	No buena - Puede generar problemas

Fuente: elaboración propia

Ahora se presentan las variables anteriores desglosadas en el esquema de DOFA matemática que se está utilizando.

Con la información diligenciada en las tablas, la DOFA genera coordenadas donde se relacionan las debilidades con las oportunidades y las fortalezas con las amenazas, ubicándolos en un gráfico que determina el estado competitivo de la empresa de la siguiente forma:

Figura 2. Estado de la empresa



Fuente. elaboración propia

Conclusiones parciales

Teniendo en cuenta la información y resultados obtenidos, se puede determinar parcialmente que hay un grado de complejidad respecto a la calidad del servicio al cliente, ya que son muchos los factores que influyen en la percepción global de este. Siendo así la mejor forma de alcanzar una buena ventaja competitiva es mediante la fidelización enfocando la gestión en aspectos como



lo son el personal encargado de generar el servicio, ya que varios de los factores que afectan el sector se derivan de este actor en el proceso de compra.

Por otra parte, la fidelización del cliente mediante la implementación de un servicio posventa puede llegar a ser sumamente importante para mejorar aspectos como lo son la promoción y recordación de la marca para el cliente, ya que se mantiene la relación, lo cual asegura que en un futuro se pueda contar con el consumo de clientes antiguos. (Escárte Sánchez, Guerra Foti, & León leal, 2004)

Adicionalmente con la figura generada a partir del peso y la valoración de cada una de las variables, se puede deducir que este sector tiene varios aspectos para mejorar, pues aunque no se encuentra en una zona de riesgo, tampoco se está en una zona de ventaja competitiva, es decir, todavía se puede mejorar para sobresalir respecto a la competencia encontrada en el terreno de juego.

Referencias

- AGN. (21 de septiembre de 2011). El FODA matemático aporta rigor científico. El mercurio.
- Amézquita G, L., y Patiño M, Y. (2011). Estudio económico del sector retail en Colombia. Industria y Comercio Superintendencia.
- Campos, A. G. (2014). El sector textile en Colombia: ¿Cómo ser más competitivos? Bogota: Universidad Militar Nueva Granada.
- Cuesta, J. (2013). Analysis of Competitive Advantages of Retail Sector. Revista Iter Ad Veritatem, (11), 138 -149.
- Del Olmo, J. L., & Fondevila Gascón, J. F. (2014). Marketing digital en la Moda. Navarra: Ediciones Universidad de Navarra.
- El Nuevo Siglo. (26 de junio de 2014). El crecimiento del retail en Colombia. Recuperado de <http://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/6-2014-el-crecimiento-del-retail-en-colombia>
- Escárte, P., Guerra, G., y León, G. (2004). ¿Por qué las chilenas no compran ropa en internet? Un estudio exploratorio sobre los factores que inhibem la compra de vestuario a traves de canales electrónicos. Valparaiso: ENEFA.
- Martinez, I. J. (2005). La comunicacion en el punto de venta, estrategias de comunicacion en el comercio real y online. Madrid: ESIC.
- Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación. (2013). Manual de servicio al cliente. Quito: Cepam.



- Moliner, B., Fayos, T., & Ruiz, M. (2015). Is it possible to increase customer satisfaction. Valencia: Universia Business Review.
- Olarte, C., Sierra, Y., y Mosquera, A. (2005). Guía profesional para una excelente venta en moda femenina. Universidad Internacional de la Rioja.
- Roca, S. (2010). Plan de negocios para la creación de una empresa, que a través del comercio electrónico, selecciona y comercializa diseños exclusivos estampados en diferentes artículos. Bogota: Pontificia Universidad Javeriana.
- Seoana, E. (2005). La nueva era del comercio (The New Era of Commerce): el comercio electrónico, las Tic al servicio de la gestion empresarial. Ideaspropias Editorial S.L.
- Talero Urrego, D. C. (2014). Servicio al cliente, una estrategia para crear ventajas competitivas en el sector de la construcción en Colombia- Ensayo para obtener el título de especialista en Alta Gerencia. Bogota: Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas.
- Vélez, L. (Agosto de 2013). Informe sector textil. Superintendencia de Sociedades. Recuperado de <http://www.supersociedades.gov.co/Documents/Informe-Sector-Textil-Oct152013.pdf>
- Vogel, M. H. (10 de Junio de 2015). Club Tablero de Comando. Obtenido de Category: FODA matemático: <https://www.tablerodecomando.com/bsc/foda-matematico-validacion-matematica-foda-factores-criticos-de-exito-mapa-estrategico>



Diseño de un aplicativo de ruteo con ventanas de tiempo VRPTW enfocado al sector retail colombiano aplicando colonia de hormigas ACO y georreferenciación

Rina Valeria Suarez Lozano y Diana Alejandra Pérez Medina¹⁷

Resumen

La distribución urbana es primordial en el desarrollo de las ciudades, ya que abarca los movimientos relacionados con el suministro y distribución de productos. De igual forma la distribución urbana debe interactuar con algunas problemáticas asociadas al entorno urbano, como lo son: el estado de las vías, el tráfico urbano, el uso de los diferentes tipos de vehículos, entre otros; por tanto, dichas problemáticas afectan directamente las operaciones de entrega de mercancía en el cumplimiento de políticas enfocadas en el servicio al cliente. Por tal motivo, los autores, proponen el diseño de un aplicativo enfocado a resolver el problema de enrutamiento de vehículos, a través del modelo VRPTW con ventanas de tiempo aplicando la metaheurística Colonia de Hormiga en su versión Ant System (AS), implementado en el lenguaje de C#.

La metodología usada en el desarrollo del aplicativo consta de cuatro fases, siendo la revisión bibliográfica la más relevante, ya que reconoce las variables y factores claves que inciden en el desarrollo del aplicativo.

Se evidencia que la herramienta es funcional, encontrando las posibles rutas, cumpliendo con restricciones operacionales. Por otro lado, las metaheurísticas se adaptan a este tipo de problemas, aun cuando no garantizan una solución o respuesta exacta.

Palabras clave: Ruteo, ventanas de tiempo, retail, hormigas ACO, georreferenciación, Ant System, VRP

Introducción

La ciudad de Bogotá es el centro urbano más grande del país, lo cual convierte al sector retail en uno de los más importantes, ya que permite abastecer a la población en gran variedad de productos necesarios para suplir sus necesidades.

Este sector se compone de hipermercados, supermercados, tiendas por departamentos, tiendas de conveniencia, entre otros. De modo que la ciudad se convierte en un gran nodo, en donde se recibe y redistribuye constantemente grandes cantidades de carga, según un boletín publicado por la CEPAL donde aseguran que “en Bogotá entran cada día alrededor de 17.000 camiones de reparto” (CEPAL, 2015).

¹⁷ Universidad Militar Nueva Granada. Grupo PIT - Producción, Innovación y Tecnología. Correo electrónico: u2902225@unimilitar.edu.co



La distribución es la última etapa de la cadena de suministro de un producto, constituyendo una parte fundamental de esta y aún más cuando se desarrolla dentro del contexto de la ciudad, considerando que debe interactuar con otros elementos particulares del entorno urbano, como lo es la gran cantidad de vehículos particulares y de servicio público, la infraestructura de las ciudades en cuanto al tema logístico, el estado de las vías, la semaforización y el tráfico en general, son problemáticas que afectan directamente las operaciones de entrega de mercancía (Antún, 2013).

En efecto, el transporte de mercancías es primordial para la disposición final de los productos en los diferentes puntos de venta, los cuales deben ser entregados conforme a especificaciones de tiempo exigidas por el cliente, cumpliendo de esta manera con la política de servicio, la cual tiene un alto nivel de importancia para las empresas en vista de que constituye valor agregado. De tal forma que se tiene la necesidad de tomar decisiones basadas en alguna herramienta cuantitativa que facilite la planeación de rutas de transporte, teniendo en cuenta las diversas limitaciones para la entrega de los productos en la ciudad.

Considerando lo anterior, al identificar esta serie de factores que afectan el proceso de distribución de mercancías dentro de la ciudad de Bogotá y dificultan el cumplimiento de la política de servicio al cliente, se propone un diseño de un aplicativo enfocado a resolver el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo VRPTW.

El objetivo del VRPTW (*Vehicle Routing Problem with Time Windows*) es la minimización de rutas, distancia y tiempo de recorridos, teniendo en cuenta la capacidad permitida para cada vehículo y la demanda requerida en cada punto a visitar; es vital en este tipo de modelo tener en cuenta los tiempos de descarga, tiempo disponible para atender a cada cliente y que las ventanas de tiempo sean cumplidas de tal forma que se eviten problemas en las relaciones con los clientes (Lozano y Guarín, 2017). Con el propósito de encontrar posibles rutas, los autores emplean la metaheurística Colonia de Hormigas para establecer la secuencia de atención de los clientes según sus requerimientos.

Colonia de Hormigas (ACO) es una metaheurística planteada por Dorigo y Stutzle (2004). Inicialmente el algoritmo surgió como método para encontrar la mejor ruta en un grafo, a partir del comportamiento de las hormigas en la naturaleza cuando estas buscan un camino entre la colonia y la fuente de alimento. En consecuencia, este modelo resuelve problemas combinatorios difíciles.

Colonia de Hormigas se basa en una comunicación indirecta entre agentes simples conocidos como hormigas artificiales. Las hormigas artificiales en ACO construyen el algoritmo a través de la aleatoriedad de probabilidades, donde se encuentran las posibles soluciones en función de los rastros de las feromonas depositadas por los agentes. El factor conocido como la feromona, tiene un comportamiento numérico el cual es distribuido por las hormigas, siendo destinada a hacer parte de las posibles soluciones a través de las iteraciones. De igual modo el proceder de la feromona dentro del algoritmo ayuda a encamina a las hormigas para que escojan los componentes más atractivos y de este modo construyan los diferentes caminos o rutas; teniendo



en cuenta un factor conocido como la evaporación de las feromonas. La evaporación, genera una disminución en la feromona depositada por cada agente a través del tiempo. Por tanto, la evaporación es importante en la resolución del algoritmo, dado que evita una convergencia rápida en la solución (Dorigo y Stutzle, 2004).

El primer ejemplo planteado a través del uso de Colonia de Hormigas inició en el uso del Agente Viajero (TSP) en la década de los años 90, desde entonces han surgido distintas investigaciones en la rama, logrando avances significativos en cuanto al rendimiento de cómputo y variedad de aplicaciones de este. Algunas aplicaciones de Colonia de Hormigas son las siguientes: línea de ensamblaje, enrutamiento de internet en organizaciones, problemas de ruteo, entre otros (Dorigo y Stutzle, 2009).

Para este trabajo se utilizó como parámetro las ventanas horarias, las cuales se ajustan a un contexto de distribución de mercancía en el sector retail, en cuanto a dar cumplimiento a los tiempos establecidos en la política de servicio. El problema consiste en encontrar rutas que satisfagan las condiciones horarias para cada uno de los clientes definidos, en este caso en la ciudad de Bogotá, aplicando la metaheurística Colonia de Hormiga en su versión Ant System (AS). En este sentido, se pretende estructurar un modelo básico tomando datos supuestos, que permita verificar la aplicabilidad de esta metaheurística para resolver problemas de este tipo.

El desarrollo del algoritmo se implementó en el lenguaje C#, el cual permite al usuario interactuar con el programa, dado que debe ingresar determinados parámetros según el tipo de situación planteada. La herramienta es funcional encontrando las posibles rutas y cumpliendo con restricciones operacionales. Pese a que existen diferentes métodos de solución para el problema de enrutamiento de vehículos, las metaheurísticas se adaptan mejor a este tipo de problemas, aun cuando no garantizan un óptimo global o solución exacta.

Marco teórico

VRP Vehicle Routing Problem

El problema de enrutamiento de vehículos (VRP: *Vehicle Routing Problem*) consiste en determinar el conjunto de rutas para visitar un conjunto de clientes distribuidos en diferentes puntos dentro de una zona limitada mediante una flota de vehículos que parten y terminan en un depósito.

Este problema se plantea como un depósito central que cuenta con una flota de vehículos y debe atender a un conjunto de clientes geográficamente distribuidos. El objetivo del VRP es entregar bienes a este conjunto de clientes con demandas conocidas, al mínimo costo, encontrando las rutas óptimas que se originan y terminan en el referido depósito. Cada cliente es servido una sola vez y todos los clientes deben ser atendidos, para lo cual se los asigna a vehículos que llevarán la carga (demanda de los clientes que visitará) sin exceder su capacidad (Hermosilla y Barán, 2005).



ACO Ant Colony Optimization

Los problemas de optimización no siempre pueden ser resueltos fácilmente por métodos tradicionales, ya que los métodos heurísticos se estancan en la búsqueda de soluciones óptimas, lo cual lleva a recurrir a un método metaheurístico para la resolución del problema.

Colonias de Hormigas, es una metaheurística inspirada en el desarrollo y comportamiento de las hormigas en la naturaleza.

Las primeras investigaciones sobre el comportamiento de estas fueron enfocadas en la comunicación entre los individuos de una colonia, y se encontró que estas utilizan una sustancia química llamada feromonas, la cual usan para dejar rastro en las rutas que estos mismos insectos recorren, con el fin de identificar posibles fuentes de alimento o el camino de regreso al nido principal. Por tanto, la inspiración dada por las hormigas en su ambiente natural es la base para trabajar en la metaheurística, la cual utiliza hormigas artificiales para encontrar una solución óptima según las restricciones dadas en la problemática (Dorigo y Stutzle , 2009).

Métodos y materiales

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de este trabajo es diseñar un aplicativo de ruteo con ventanas de tiempo VRPTW aplicando colonia de hormigas - ACO y georreferenciación, en un contexto simulado asociado al sector retail en cuanto a tiempo y demanda requeridos, en cumplimiento a la política de servicio, representada en las ventanas de tiempo, se siguió un enfoque metodológico dividido en cuatro fases.

En la primera fase se realizó una revisión bibliográfica de la literatura (estado del arte). En la segunda fase se identificaron las variables a partir de la revisión bibliográfica, con el fin de establecer algunos de los factores que afectan la distribución de mercancías en relación con el sector retail. La tercera fase consiste en el diseño y estructuración del aplicativo según el modelo establecido, teniendo en cuenta la aplicación de colonia de hormigas. Y finalmente en la cuarta fase se realiza la validación del aplicativo a partir de escenarios de funcionalidad.

Estructuración y diseño del aplicativo

Teniendo en cuenta la identificación de variables, se procede con el diseño del aplicativo.

El algoritmo que se codificó se basa en la metaheurística colonia de hormigas en su variante Ant System (AS), propuesto por Dorigo y Maniezzo en el año 1991 (Dorigo y Stutzle, 2004). El modelo consiste en que para cada hormiga se aplica un procedimiento el cual permite la construcción de cada ruta; de acuerdo a lo dicho por Benitez y Acosta (2017), dicho método consta de escoger una ciudad de inicio en donde la hormiga será posicionada, usar la cantidad de feromona y los valores heurísticos para que probabilísticamente se construya un camino y recorra los nodos que no se han visitado y volver a la ciudad de origen. En el desarrollo del



algoritmo se considera dos fases principales: la construcción de la solución por las hormigas y la actualización de la feromona.

Se utilizó la vertiente Ant System (AS) dado que es fundamental para entender el funcionamiento de esta metaheurística e introducirse en el tema. Es el primer algoritmo desarrollado de ACO.

Pseudocódigo del algoritmo

La creación del seudocódigo permite al lector entender de forma clara y concisa las instrucciones dadas al algoritmo para su correcta ejecución.

Figura 1. Seudocódigo del aplicativo

```
INICIO
  Inicializar matriz de distancias ()
  Inicializar matriz de tiempos ()
  Inicializar matriz de feromonas ()
  Inicializar matriz de probabilidad ()
  IF (número de iteraciones del algoritmo)
    Inicializar vector suma ()
    Calcular vector tao x visibilidad ()
    Calcular matriz de probabilidad ()
    Construir vector de números aleatorios ()
    Inicializar matriz de comparación ()
    Inicializar matriz de ruta ()
    Inicializar vector de comparación ruta ()
    FOR (número de vehículos)
      Generar número aleatorio ()
      Construir escala de probabilidad ()
      Seleccionar el punto ()
      Verificar probabilidad ()
      Verificar condicional capacidad ()
        SI (cumple la condición anterior)
          Verificar condicional tiempo ()
        FIN SI
      Calcular vector de probabilidad ()
      Construir ruta ()
      Organizar y mostrar la ruta calculada ()
    FIN FOR
    Calcular distancia recorrida ()
    Calcular tiempo transcurrido ()
    Actualizar matriz feromona ()
  FIN IF
  Mostrar ruta de cada vehículo ()
  Graficar ruta por vehículo ()
FIN
```

Fuente: elaboración propia



Arquitectura del aplicativo

La problemática contemplada involucra un conjunto de variables y parámetros, de los cuales algunos de sus valores fueron predeterminados por los autores al momento de realizar la programación de la herramienta. Algunas variables se encuentran abiertas para el ingreso del usuario en la interfaz gráfica.

Los parámetros establecidos internamente son los siguientes:

Tabla 1. Descripción de variables internas en la programación del aplicativo

Parámetro	Descripción	Valor
τ_0	Cantidad de feromona inicial	0,1
η_{ij}	Visibilidad/información heurística	$1/d_{ij}$
β	Importancia de la relativa de la feromona	1
α	Influencia relativa de la feromona	1
Tiempo de descargue	Tiempo empleado en la descarga de mercancía	0,1

Fuente: elaboración propia

La tabla 2 indica los parámetros que deben ser ingresados por el usuario.

Tabla 2. Parámetros de interfaz gráfica

Parámetro	Descripción
Número de clientes / n	Indica el número de clientes o nodos del problema
Número de vehículos / m	Indica el número de vehículos u hormigas
Demanda	Cantidad de bienes o productos solicitados por los clientes
ρ (ro)	Coefficiente de evaporación de la feromona
Número de iteraciones	Denota el número de repeticiones de ejecución del algoritmo
Ventanas de tiempo	Indica el periodo de tiempo entre un intervalo de inicio y fin/ periodo en donde se puede servir a los clientes
Velocidad	Distancia recorrida en determinado tiempo

Fuente: elaboración propia

Al no ser posible modelar todas variables en un contexto real, tales como el estado de las vías, la semaforización y el tráfico en general, se definió agrupar estas de manera ideal a través de una variable conocida y constante para cada simulación, que en este caso es la velocidad. Lo anterior teniendo en cuenta que el tiempo empleado en un recorrido es una relación entre la distancia que se recorre y la velocidad, factor importante para dar cumplimiento a las ventanas de tiempo.



Como menciona Arias (2010), para determinar la ruta más rápida, lo más sensato es pensar en un inicio, en la ruta más corta en términos de distancia, sin embargo, cuando se viaja a una velocidad constante, el tiempo y la distancia son variables directamente proporcionales. Lo anterior significa que, al contemplar la velocidad como una constante en todo el recorrido, la ruta de menor distancia sería la que menor tiempo tomaría recorrer.

Cabe destacar en la arquitectura del aplicativo, el cálculo de distancias con base a coordenadas geográficas. Este cálculo es realizado a través de la fórmula conocida como *Great-Circle Distance*, la cual calcula la distancia ortodrómica (conocida como la distancia más corta en una esfera) entre dos puntos. Esta fórmula posee fundamentos en la geometría de Riemann (Bernhard, 1853).

Ecuación 1: Great-Circle Distance

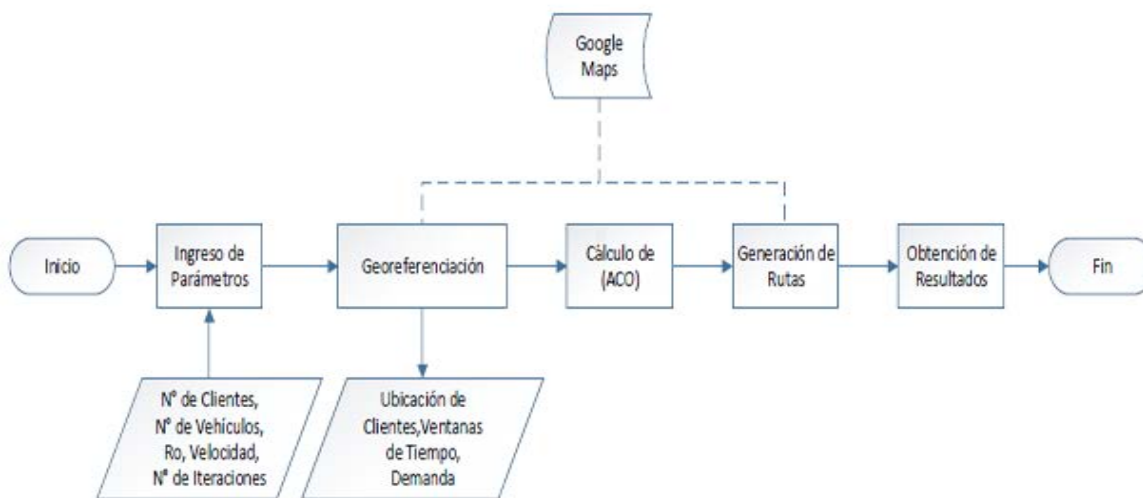
$$d = r * \text{acos} [\text{sen} (\text{lat1}) * \text{sen} (\text{lat2}) + \text{cos} (\text{lat1}) * \text{cos} (\text{lat2}) * \text{cos} (\text{lon2} - \text{lon1})]$$

Fuente. Tip y trucos de GIS.

Donde el valor de (r) corresponde a la longitud de un grado de latitud geodésica, en este caso 111,32 km.

Finalmente, la figura 2 explica el proceso que ejecuta el aplicativo desarrollado por los autores.

Figura 2. Diagrama de flujo del aplicativo



Fuente: elaboración propia.

Diseño del aplicativo.

Se caracteriza por ser el diseño de la interfaz gráfica que posee el aplicativo para su correcto funcionamiento. Esta interfaz consta de tres partes, las cuales se describen a continuación.

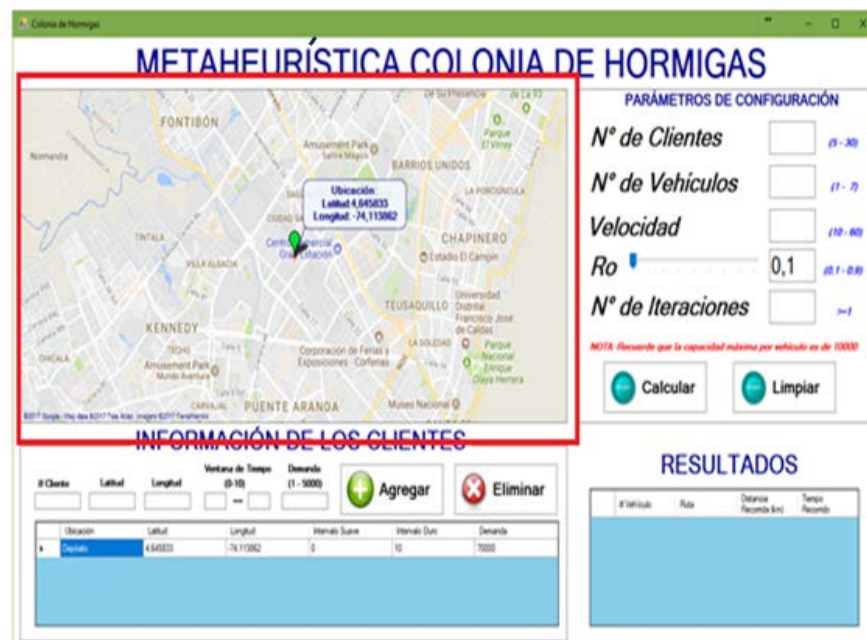


Figura 3. Interfaz gráfica del aplicativo



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Complemento Gmaps.net - interfaz gráfica



Fuente. elaboración propia



- Complemento de Gmaps.net
Esta librería permite la visualización del mapa de Google, el cual se encuentra enfocado en la ciudad de Bogotá D. C., el punto de distribución dado por los autores se encuentra predeterminado en la Zona Industrial de Montevideo.

Figura 5. Información de los clientes - interfaz gráfica



Fuente: elaboración propia

- Información de los clientes
Permite almacenar la siguiente información:
 - Ubicación (dada en longitud y latitud).
 - Ventana de tiempo (la cual permite dar valores de 0 a 10).
 - Demanda por cliente (se permite un máximo de 5.000). Internamente el aplicativo tiene una capacidad para cada vehículo con un valor máximo de 10.000.

Finalmente, esta sección cuenta con botones para agregar o eliminar la información suministrada.



Figura 6. Parámetros de configuración dados por el usuario - interfaz gráfica



Fuente: elaboración propia.

- Parámetros de configuración
 Se pueden observar las variables con las cuales el usuario puede interactuar:
 - N.º de clientes (toma valores desde 5 a 30).
 - N.º de vehículos (con un rango desde 1 hasta 7).
 - Velocidad (la cual toma valores desde 10 hasta 60).
 - La variable ρ (puede variar desde 0,1 a 0,9).
 - N.º de iteraciones (las cuales pueden iniciar con un valor no inferior a 1).

De igual modo, esta sección posee dos botones para calcular y eliminar los datos.

Validación del aplicativo

La validación del aplicativo consta de tres fases.

Para entender mejor el comportamiento del algoritmo, inicialmente se plantearon cuatro escenarios en donde se evalúa cuál es el efecto de la variación de algunos parámetros en los resultados obtenidos. Posteriormente, se tomó un caso de referencia con el fin de poder comparar los resultados y determinar su diferencia a través de la medida del error relativo. Finalmente, se extrajo una instancia del autor Solomon para fines de comparación.

El aplicativo está programado en C#, compilado a través de Visual Studio 2017. Las pruebas se ejecutaron en un computador portátil con un procesador Intel Core i3- 6006U de 2.00 GHz, 4 GB de memoria RAM y un sistema operativo de 64 bits.



Escenarios propuestos por los autores

Con el propósito de validar el funcionamiento del aplicativo, se evaluaron casos en donde se realizan variaciones a distintos parámetros.

Las diferentes pruebas se realizaron teniendo en cuenta la información que se encuentra en la tabla 3.

Tabla 3. Información de los clientes

Clientes	Ubicación	Ventanas de tiempo		Demanda (Kg)
		Suave/Inicio	Fuerte/Final	
1	Cra. 6 #15-88	1	2	5000
2	Cl. 47 #9-10	0	1	5000
3	Ac 63 #7-9	1	2	5000
4	Cl. 116 #19-17	2	3	5000
5	Ac 80 #69Q-50	3	4,2	5000
6	Cra. 68b #24-39	4,5	5	5000
7	Cra. 30 #2B-19	5,3	6	5000
8	Ak 45 #173-60	6,2	8,5	5000

Fuente: elaboración propia.

Se contemplan 8 clientes, cada uno ubicado en un lugar diferente de la ciudad de Bogotá y en donde todos tienen asignada una ventana de tiempo y un determinado número de demanda, para este caso, se realiza la prueba con la máxima cantidad de producto que puede ser solicitada por cliente (5.000 kg).

Escenario 1. Aumento en el Número de Iteraciones

Como prueba se hacen 9 corridas variando el número de iteraciones, cada uno de los valores obtenidos resultan de sumar los resultados de cada una de las rutas arrojadas por el algoritmo en cada iteración, lo anterior se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros y resultados - escenario 1

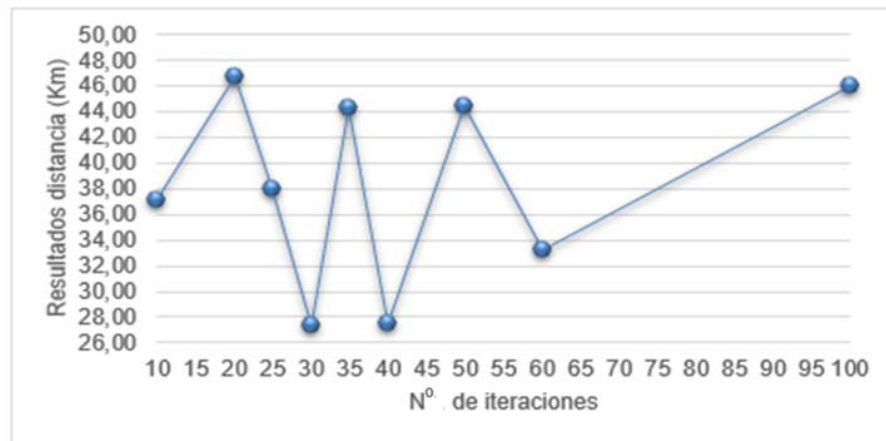
N° de Iteración	Valor de ρ	Velocidad (20-60)	Distancia Recorrida (Km)	Tiempo Total	Tiempo de ejecución (s)
10	0,1	30	37,085	2,04	2,15
20	0,1	30	46,767	2,36	2,73
25	0,1	30	37,991	2,08	3,15
30	0,1	30	27,418	1,72	3,65
35	0,1	30	44,285	2,28	4,22
40	0,1	30	27,422	1,72	4,73
50	0,1	30	44,453	2,27	5,81
60	0,1	30	33,169	1,91	6,71
100	0,1	30	46,076	2,32	10,7

Fuente: elaboración propia



De acuerdo con los resultados, se observa que la ruta con menor distancia se obtuvo en la iteración 30. La figura 7 muestra la convergencia de los resultados obtenidos en cada iteración.

Figura 7. Convergencia resultados - escenario 1



Fuente: elaboración propia

Se observa que el algoritmo converge rápidamente hacia un valor aproximadamente entre las iteraciones 20 y 35. Cuando se aumenta el número de iteraciones los resultados fluctúan, arrojando nuevamente resultados lejanos al de menor distancia. Los resultados convergen hacia un valor (óptimo local) y a partir de ahí no presentan mejoras significativas. Las soluciones obtenidas cumplen con condiciones de factibilidad.

Escenario 2. Variación en el coeficiente de evaporación de la feromona (ρ).

El siguiente análisis se realizó para el parámetro (ρ), se llevaron a cabo 5 ejecuciones para 4 valores diferentes de este parámetro, se evaluó sobre los coeficientes 0.2, 0.4, 0.6 y 0.9 respectivamente. La tabla 5 resume los parámetros que se utilizaron durante la prueba.



Tabla 5. Parámetros y resultados - escenario 2

N° de Iteración	Valor de ρ	Velocidad (20-60) (Km/t)	Distancia Recorrida (Km)	Tiempo Total	Tiempo de ejecución (s)
10	0,1	30	27,027	1,70	1,55
20	0,1	30	26,450	1,68	2,45
30	0,1	30	24,365	1,61	3,45
40	0,1	30	24,365	1,61	4,65
50	0,1	30	41,010	2,17	5,6
10	0,4	30	34,472	1,95	2,11
20	0,4	30	36,269	2,01	2,5
30	0,4	30	45,420	2,32	3,51
40	0,4	30	27,027	1,7	4,6
50	0,4	30	45,422	2,32	5,2
10	0,6	30	30,633	1,81	1,58
20	0,6	30	45,154	2,31	3,01
30	0,6	30	37,200	2,05	3,55
40	0,6	30	33,580	1,93	4,58
50	0,6	30	41,854	2,19	5,57
10	0,9	30	42,219	2,21	1,58
20	0,9	30	37,175	2,05	2,2
30	0,9	30	38,573	2,08	3,45
40	0,9	30	27,027	1,7	4,83
50	0,9	30	26,214	1,67	5,68

Fuente: elaboración propia

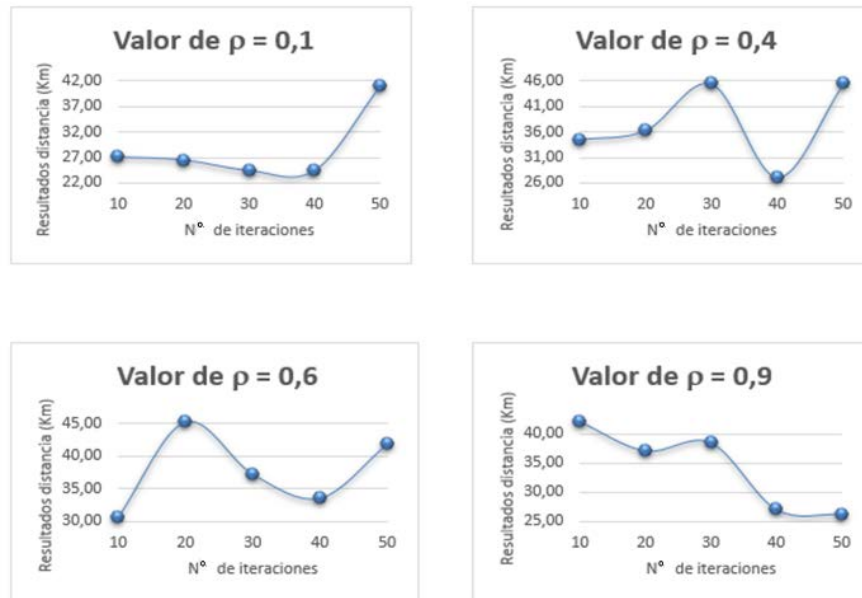
El coeficiente de evaporación establece la velocidad a la que se reduce la feromona en cada arco. De acuerdo con lo mencionado por Arias (2010), si su valor es muy grande, la feromona se evaporará rápidamente y el algoritmo convergerá a una solución en las primeras instancias de la ejecución.

Teniendo en cuenta la actualización del rastro de feromona, la evaporación favorece que se exploren nuevas zonas. Cuando la feromona no se evapora, puede ocasionar una convergencia muy rápida hacia una región subóptima.

Los resultados de las pruebas se presentan en la siguiente serie de gráficas (figura 8), las cuales representa el número de iteraciones contra los resultados en cuanto a distancia para cada caso, utilizando diferentes valores del coeficiente de evaporación.



Figura 8. Convergencia presentada a través de la variación de ρ



Fuente: elaboración propia.

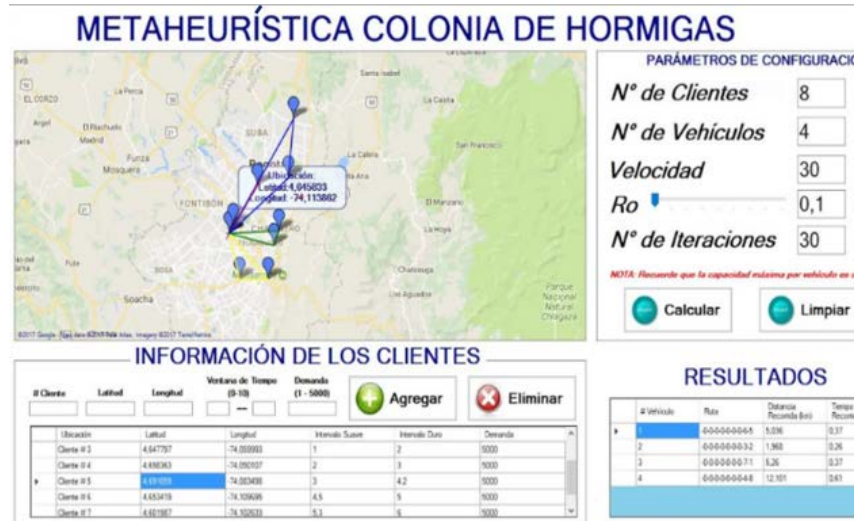
Al observar las gráficas, se tiene que para el primer caso cuando se evalúa el problema considerando el valor de (ρ) como 0,1, se obtienen mejoras hasta la iteración 30. En el segundo caso la convergencia asignando un coeficiente de evaporación de 0,4, se encuentra a partir de la iteración 40. Para el tercer caso, con (ρ) de 0,6, el algoritmo converge a una solución en las primeras iteraciones de la ejecución, a partir de la iteración 10 no se observan mejoras. Por último, en el cuarto caso, asignando un valor (ρ) de 0,9, se encontraron mejoras hasta la iteración 50, por lo cual se puede decir que en este caso se aprovechó el alto número de iteraciones, pero su resultado no fue el más bajo.

Con este análisis se busca identificar cómo afecta el coeficiente de evaporación la diferencia en la calidad de las soluciones, es decir, a las cuantas soluciones se obtuvo un mejor resultado. Utilizando valores (ρ) bajos, se encuentran mejores resultados alrededor de las 30 a 40 iteraciones. Al evaluar el caso tomando un coeficiente de 0,6, el algoritmo arrojó el mejor resultado en la iteración 10, sin embargo, se observa que este valor es mayor que los obtenidos con (ρ) bajos.

Adicionalmente, con base a las pruebas realizadas en este escenario, se identifica que el algoritmo arrojó soluciones de mejor calidad utilizando el coeficiente más bajo disponible. La ruta con menor distancia corresponde a la iteración 30, con (ρ) de 0,1; valor que a su vez se repite en la iteración 40 con el mismo coeficiente de evaporación, dado que el algoritmo arrojó la misma combinación de rutas, pero asignando diferente orden de vehículos, tal como se observa en las siguientes figuras (9 y 10).



Figura 9. Solución arrojada por el aplicativo – n.º de iteraciones (30)



Fuente: elaboración propia.

En este caso el algoritmo arrojó las rutas: vehículo 1, puntos 6-5; vehículo 2, puntos 3-2; vehículo 3, puntos 7-1 y vehículo 4, puntos 4-8.

Figura 10. Solución arrojada por el aplicativo – n.º de iteraciones (40)



Fuente: elaboración propia

En este caso el algoritmo arrojó las rutas: vehículo 1, puntos 3-2; vehículo 2, puntos 4-8; vehículo 3, puntos 7-1 y vehículo 4, puntos 6-5.



Al variar el número de iteraciones bajo los mismos parámetros, se presentó en todos los escenarios un comportamiento similar al descrito anteriormente, dado que en ciertos casos se repetían algunas secuencias de ruta. Para esta solución se alcanzaron resultados factibles.

Escenario 3 - variación de la velocidad

Para este análisis se realizó una variación en la velocidad. Se hicieron 15 corridas tomando 3 valores diferentes de velocidad. La información correspondiente se encuentra en la tabla 6.

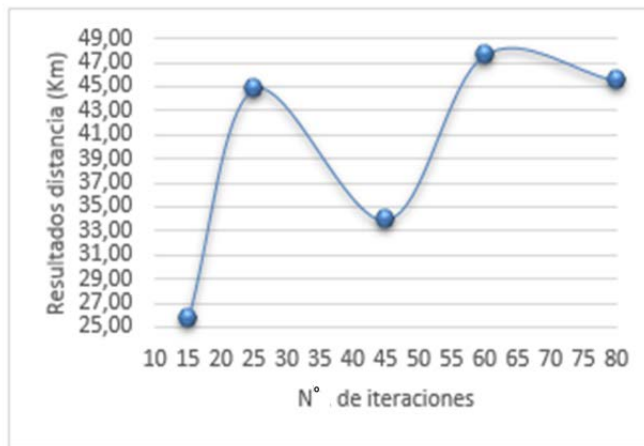
Tabla 6. Parámetros y resultados - escenario 3

N° de Iteración	Valor de ρ	Velocidad (20-60)	Distancia Recorrida (Km)	Tiempo Total	Tiempo de ejecución (s)
15	0,1	20	25,672	2,08	2,1
25	0,1	20	44,820	3,04	3,04
45	0,1	20	33,876	2,5	5,05
60	0,1	20	47,697	3,19	6,52
80	0,1	20	45,490	3,08	8,20
15	0,1	35	27,053	1,56	2,02
25	0,1	35	33,015	1,74	3,02
45	0,1	35	27,422	1,57	5,10
60	0,1	35	44,520	2,07	6,50
80	0,1	35	27,873	1,59	8,00
15	0,1	60	34,692	1,37	1,99
25	0,1	60	25,202	1,22	2,90
45	0,1	60	37,200	1,41	5,02
60	0,1	60	26,924	1,25	6,40
80	0,1	60	22,583	1,26	8,56

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas se presentan en la siguiente serie de gráficas (figuras 11, 12 y 13) en las que se representa el número de iteraciones contra los resultados en cuanto a distancia obtenidas, al cambiar solo el parámetro de velocidad.

Figura 11. Convergencia de resultados con velocidad de 20

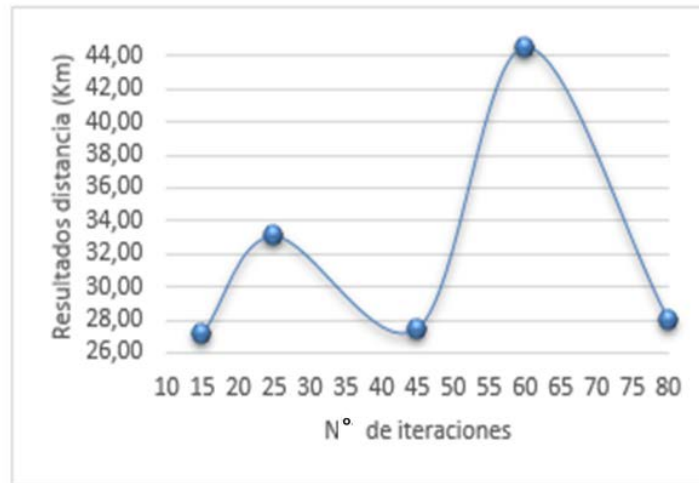


Fuente: elaboración propia



Cuando la velocidad es baja, se identifica una convergencia a partir de la iteración 15.

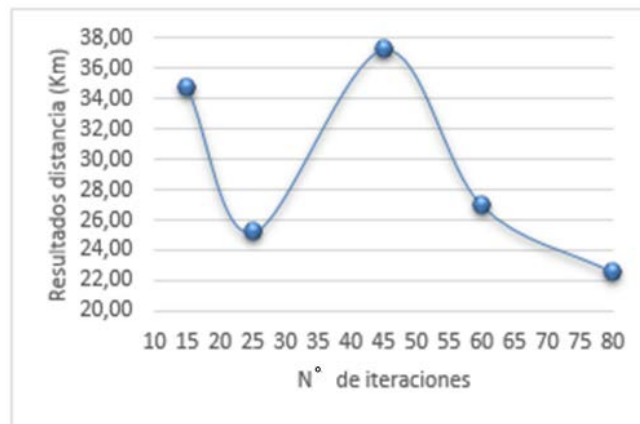
Figura 12. Convergencia de resultados con velocidad de 35



Fuente: elaboración propia.

Considerando un valor de 35 para la velocidad, el algoritmo encontró el mejor resultado nuevamente hasta la iteración 15.

Figura 13. Convergencia de resultados con velocidad



Fuente: elaboración propia.

Al tomar el valor máximo de velocidad permitido en el aplicativo, se logra el mejor resultado hasta la iteración 80, siendo a su vez la ruta con menor distancia y tiempo de todo el escenario. Esto evidencia la relación que existe entre la distancia y una velocidad constante, a mayor velocidad el tiempo de ruta es menor.

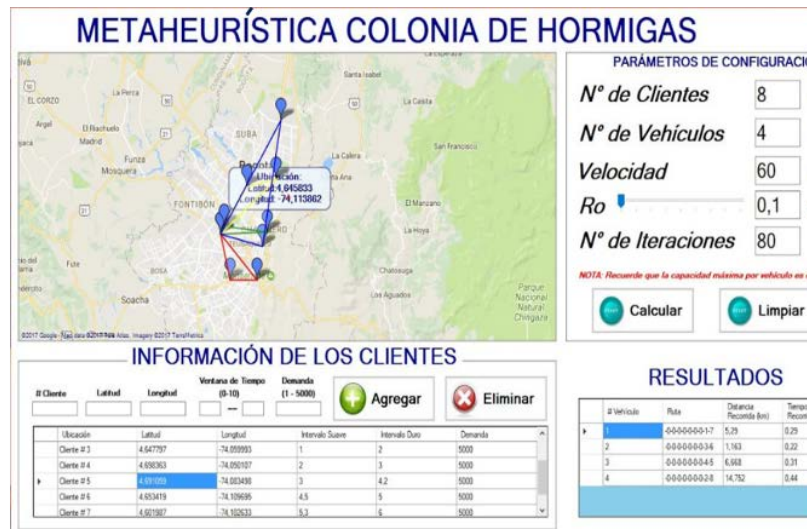


A nivel general, los resultados al variar la velocidad muestran pequeñas variaciones asociadas a que cuando se le asigna un valor pequeño a este dato, la distancia y el tiempo aumentan, a diferencia de que se le asigne un valor alto, estas variables disminuyen.

Las soluciones obtenidas satisfacen todas las restricciones.

La figura 14, muestra el ruteo generado por el aplicativo para la iteración 120.

Figura 14. Solución arrojada por el aplicativo – n.º de iteraciones (40)



Fuente: elaboración propia.

Escenario 4 - nuevas condiciones

Con el objetivo de ampliar el análisis y observar el comportamiento del algoritmo aumentando el número de ciclos, se planteó una prueba con 9 clientes y 3 vehículos, demandando una menor capacidad. La información correspondiente se observa en la tabla 7.

Tabla 7. Información de los clientes - escenario 4

Clientes	Ubicación	Ventanas de tiempo		Demanda (Kg)
		Suave/Inicio	Dura/Final	
1	Cra. 6 #15-88	3	5	2300
2	Cl. 47 #9-10	3,6	6	500
3	Ac 63 #7-9	0	2,5	3500
4	Cl. 116 #19-17	8.4	10	750
5	Ac 80 #69Q-50	0	10	4000
6	Cra. 68b #24-39	4	7.8	3800
7	Cra. 30 #2B-19	2	3	2000
8	Ak 45 #173-60	0	2	5000
9	Av. Boyacá #134-15	5	6	2000

Fuente: elaboración propia.



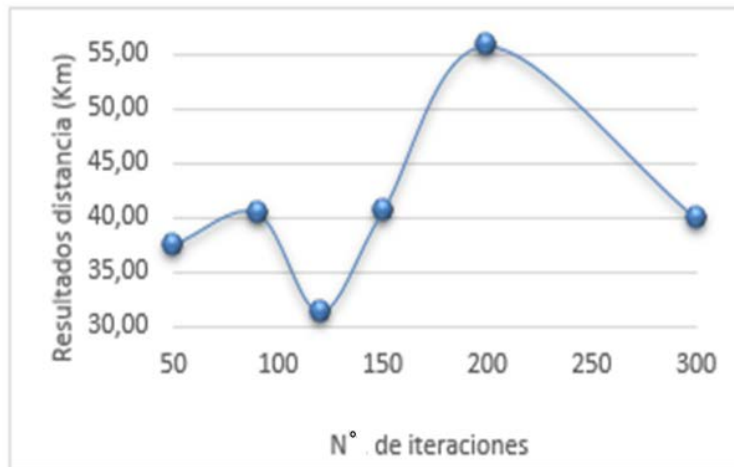
Para realizar la respectiva prueba, se realizan 6 corridas variando el número de iteraciones. En esta ocasión, se ingresa un número alto de iteraciones, lo cual se observa en la tabla 8.

Tabla 8. Parámetros y resultados - escenario 4

N° de Iteración	Valor de ρ	Velocidad (20-60)	Distancia Recorrida (Km)	Tiempo Total	Tiempo de ejecución (s)
50	0,1	20	37,509	2,79	6,15
90	0,1	20	40,436	2,92	9,67
120	0,1	20	31,385	2,46	12,40
150	0,1	20	40,578	2,93	16,10
200	0,1	20	55,752	3,68	20,52
300	0,1	20	39,856	2,89	35,65

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Convergencia en los resultados - escenario 4



Fuente: elaboración propia.

Observando la se obtuvo la mejor solución hasta la iteración 120. No se perciben grandes variaciones en la calidad del resultado con respecto a la prueba con menos iteraciones. Al igual que en el análisis del primer escenario, cuando los resultados convergen hacia un valor, el algoritmo no vuelve a proporcionar resultados cercanos al óptimo. Las soluciones obtenidas cumplen con condiciones de factibilidad.

La figura 16, muestra el ruteo generado por el aplicativo para la iteración 120.



Figura 16. Solución arrojada por el aplicativo - n.º de iteraciones (120)



Fuente: elaboración propia.

Con relación al tiempo de ejecución para todos los escenarios, a medida que el número de iteraciones aumenta este tiempo es cada vez mayor, es decir, que a mayor número de iteraciones el algoritmo requiere de un tiempo mayor para arrojar la solución.

Con respecto a las iteraciones, se puede concluir que en ningún escenario resultaron determinantes, es decir, que aumentar el número de soluciones no quiere decir que la probabilidad de encontrar un mejor resultado será mayor. Esto debido a que cuando se llega a un determinado número de iteraciones, los resultados tienden hacia un valor y no se muestran mejoras significativas a partir de este.

Conclusiones

En este trabajo se presentó la revisión y análisis de un conjunto de documentos académicos relacionados con el ruteo de vehículos y la metaheurística Colonia de Hormigas, con el propósito de mostrar el panorama en el que se encuentra la problemática planteada y de igual forma obtener la información necesaria con respecto a las variables y parámetros que intervienen los temas tratados.

Al analizar las diversas aplicaciones dadas a las temáticas por cada uno de los autores consultados, se reconocieron las variables y restricciones que se adaptan a la definición del problema estudiado. Se hace hincapié en que al no ser posible modelar todas las variables en un contexto real, se agruparon los problemas que afectan la movilidad de Bogotá D. C., en una variable conocida, definida para este caso como la velocidad. Lo anterior teniendo en cuenta que el tiempo empleado en un recorrido es una relación entre la distancia que se recorre y la velocidad,



factor fundamental para dar cumplimiento a las ventanas de tiempo, favoreciendo los niveles de servicio.

Teniendo en cuenta lo anterior y la definición del problema, se diseñó un aplicativo que materializó las relaciones identificadas en la revisión desarrollada. En esta herramienta se utilizó la metaheurística Colonia de Hormigas (ACO), en su variante básica: Sistema de Hormigas (AS), para resolver el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo VRPTW. El desarrollo del modelo se implementó en el lenguaje C#, el cual permite al usuario interactuar con el programa, puesto que él mismo debe ingresar determinados parámetros que dependen del tipo de situación que se plantee.

Para la validación del aplicativo se llevaron a cabo una serie de pruebas utilizando datos supuestos, variando el número de iteraciones, el coeficiente de evaporación de la feromona (ρ) y la velocidad. Así pues, se evidenció que la modificación de algunos parámetros dentro del algoritmo permite encontrar rutas más cortas, hecho mencionado por diferentes autores en sus trabajos. Adicionalmente, se hicieron pruebas a modo de comparación con resultados conocidos de la literatura, corroborando las condiciones de factibilidad para las soluciones obtenidas.

Este aplicativo se propone con el fin de encontrar la mejor ruta posible para cada vehículo en donde se respeten los intervalos de tiempo y demás restricciones operacionales en un entorno simulado. Pese a que existen diferentes métodos de solución para el problema de enrutamiento de vehículos, las metaheurísticas se adaptan mejor a este tipo de problemas, aun cuando no garantizan un óptimo global, se aproximan bastante.

Se concluye que la herramienta es funcional de acuerdo con los criterios establecidos en la modelación, lo cual se demostró a través de las diferentes pruebas realizadas. No obstante, en este trabajo la metaheurística Colonia de Hormigas es aplicable al contexto bogotano, considerando datos supuestos, de manera que este aplicativo se puede considerar como el primer paso para la posible implementación de una aproximación más real.

Investigaciones futuras

Se pueden analizar otras variantes de la metaheurística Colonia de Hormigas. De igual forma se propone contemplar algoritmos híbridos asociados a Colonia de Hormigas, los cuales pueden contribuir a mejorar la calidad de las soluciones obtenidas.

Para este trabajo se utilizaron datos supuestos que permitieron modelar una situación asociada al sector retail, verificando la aplicabilidad de Colonia de Hormigas. Sin embargo, se puede tomar como base para futuros trabajos implementando otros elementos que lo conduzcan a un entorno más real, por ejemplo, contextualizándolo con políticas como el CONPES y otras políticas públicas de la ciudad u obtener datos reales de alguna entidad.



Adicional, se propone la implementación de parámetros que permitan obtener información de aspectos como la velocidad y la congestión en las rutas en tiempo real o adicionar tiempos de contingencia producto de dichas variables.

Referencias

- Amezquita, L., & Patiño, Y. (Diciembre de 2011). *Estudio Económico del sector Retail en Colombia*. SIC. Recuperado de http://www.sic.gov.co/recursos_user/documentos/promocion_competencia/Estudios_Economicos/Estudio%20economico%20Retail.pdf
- Anaya, J. (2007). *Logística integral, la gestión operativa de la empresa*. Madrid: ESIC.
- Antún, J. (2013). *Distribución urbana de mercancías: estrategias con centros logísticos*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Arias Rojas, J. (2010). *Aplicación de un modelo de optimización en la planeación de rutas de los buses escolares del colegio Liceo de Cervantes Norte*. Bogotá, Colombia.
- Ballou, R. (2004). *Logística: administración de la cadena de suministro*. México: Pearson.
- Benitez, P. A., y Acosta, J. (2017). *Optimización basada en metaheurísticas: una aproximación a la solución del problema de ruteo de vehículos con ventanas horarias*. Bogotá D. C., Colombia.
- Bernhard, R. (1853). *Riemannian Geometry*.
- Burbano, E., y Morales, C. (2010). *Incidencia de la logística en el marketing*.
- CEPAL. (2015). *El complejo rompecabezas del transporte urbano de mercancías*. Bogotá D. C.
- Closs, D., Cooper, M., y Bowersox, D. (2007). *Administración y logística en la cadena de suministros*. McGraw-Hill.
- Cordeau, J., & Groupe d'études et de recherche. (2000). *The Vrp with Time Windows*. Montreal.
- Decreto 690. (2013). *Por medio del cual se modifica el Decreto 520 de 2013, que establece restricciones y condiciones para el tránsito de los vehículos de transporte de carga en el área urbana del Distrito Capital y se dictan otras disposiciones*. Bogotá D. C. Recuperado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=56330>
- Decreto 520. (2013). *Por el cual se establecen restricciones y condiciones para el tránsito de los vehículos de transporte de carga en el área urbana del Distrito Capital y se dictan otras disposiciones*. Bogotá D. C.: Recuperado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=55472>.
- Departamento Nacional de Planeación. (2014). *Consejo Nacional de Política Económica y Social CONPES*. Bogotá, Colombia.



- Donrroso, B. (2006). *The VRP web*. Recuperado de <http://www.bernabe.dorrnsoro.es/vrp/index.html?/results/resultsSolom.htm>
- Dorigo, M., & Stutzle, T. (2009). *Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances*. Bruxelles: Université Libre de Bruxelles.
- Dorigo, M., & Stutzle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. London: Massachusetts Institute of Technology.
- Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T. (2006). *Ant Colony Optimization*. Bruxelles: Université Libre de Bruxelles.
- Erdoğan, G. (2015). *VRP Spreadsheet Solver*. Reino Unido.
- Florez, D. (2016). *Diseño de un modelo para medir el impacto de las políticas públicas en los procesos de distribución urbana en Bogotá*. Bogotá D. C., Colombia.
- Goel, R., & Maini, R. (2018). A hybrid of Ant Colony and firefly algorithms (HAFA) for solving vehicle routing problems. *Journal of Computational Science*, 28-37.
- Guarín, C. J., & Lozano P. A. (2016). *Modelo logístico para la distribución de productos en el sector retail dentro de una red de abastecimiento dirigida por la demanda*. Bogotá D. C., Colombia.
- Hermosilla, A., & Barán, B. (2005). Comparación de un sistema de colonias de hormigas y una estrategia evolutiva para un problema multiobjetivo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo. *Latin-American Conference on Informatics–CLEI*, 10.
- Hernández, Y. A. (Mayo de 2016). *Diseño de un sistema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos en empresas de transporte de carga por carretera*. Bogotá D. C.
- Jacques, A. S., Godet, M., & Meunier, F. (1999). *Análisis estructural con el método micmac y estrategia de los actores con el método mactor*.
- La Prospective. (2010). *La prospective*.
- Lozada, A., & Cadena, R. (2012). *Solución del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) mediante métodos heurísticos*. Bucaramanga.
- Lozano A., y Guarín C. J. (2017). *Modelo logístico para la distribución de productos en el sector retail dentro de una red de abastecimiento dirigida por la demanda*.
- Sarmiento, A. (Febrero de 2014). *Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: aplicación de la metabeurística búsqueda tabú*. Chía- Cundinamarca.
- Secretaría de Planeación . (2016). *Estadísticas, proyecciones de población*. Recuperado de <http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/InformacionTomaDecisiones/Estadisticas/ProyeccionPoblacion:Proyecciones%20de%20Poblaci%F3n>



- Secretaria Distrital de Movilidad. (2016). *Movilidad en cifras*. Recuperado de <http://www.simur.gov.co/SimurVisorBoletinWA/2016.html#PDF/1>
- Servera, D. (2010). Concepto y evolución de la función logística. *Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*.
- Sterling, J., & Lambert, D. (1989). *Customer service research: past, present and future*.
- Tabares, I. A. (2013). *Centro logístico industrial y plataforma logística Mosquera/Funza como parte de la estrategia de logística satelital de modelos replicables en Colombia, para el mejoramiento de la competitividad económica y la disminución de impactos negativos*. Bogotá D. C.
- Teschemacher, U., y Reinhart, G. (2017). Algoritmos de optimización de colonia de hormigas para habilitar la logística dinámica de "Milkrun". *Procedia CIRP*.
- Torres-Rabello, R. (2011). *Midiendo desde los zapatos del cliente: el Fill-Rate y el OTIF*.
- Toth P. & Vigo, D. (2000). *The vehicle routing problem*. *Society for Industrial and Applied Mathematics*.
- Universidad de los Andes, y CCB. (2015). *Observatorio de movilidad*. Reporte anual de movilidad 2015. Recuperado de <http://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/18119>



Análisis de tendencia al consumidor en la compra de ropa masculina

Juan David Villarreal Murcia¹

Resumen

Las empresas en la industria textil cuentan con una estructura organizacional, en la que por medio de un análisis de tendencia al consumidor se buscan identificar aspectos y estrategias necesarias para desarrollar la venta y asesorar al cliente de la mejor manera en el buen vestir. El posicionamiento en las marcas es un factor fundamental en el que la comunicación, la imagen percibida, el planograma de las tiendas y la identidad son parte de la organización para lograr estrategias en el crecimiento financiero. Por medio de publicidad, servicio posventa y demás aspectos relacionados con el marketing industrial, se llega a tener una idea clara y concisa para entregar un análisis de tendencia al consumidor. Esta propuesta se realiza para identificar el posicionamiento de una compañía y que esta mejore en aspectos organizacionales y estratégicos.

Se procedió por medio de un análisis interno, en el que se encuentra el análisis de recursos propios y disponibles, de costos, del producto, del precio, de la política de comunicación y de la distribución; para evaluar los recursos con los que cuenta la empresa, conocer su situación actual, como también entender las capacidades financieras y organizacionales de la compañía. Así mismo, por medio de un análisis externo, en el que se encuentra el análisis del sector y del mercado de referencia, el índice de saturación, el análisis socioeconómico del mercado potencial, las expectativas del mercado, el ciclo de vida del producto y el análisis estratégico de la competencia; para identificar y evaluar los cambios y tendencias en el mercado actual en torno a la empresa. Una vez organizado el análisis interno y externo se confecciona la matriz DOFA, la cual es una herramienta fundamental para fijar estrategias. El alcance de esta propuesta sirve para compañías en la industria textil enfocadas en ropa masculina. Una vez determinada la segmentación, identificando las necesidades, características y comportamientos del consumidor, se procede a aplicar la estrategia B2C *business to consumer* para elaborar el análisis de tendencia al consumidor de una marca en la industria textil, que ayuda a determinar el posicionamiento, la competencia y las maniobras necesarias para mejorar aspectos como lo es la imagen percibida, la comunicación con el cliente, el volumen de ventas y determinar las decisiones que influyen en la compra del cliente.

Palabras clave: análisis de tendencia al consumidor, posicionamiento, producto, precio, comunicación, ventas, segmentación, industrial textil.

¹ Grupo PIT - Producción, Innovación y Tecnología. Universidad Militar Nueva Granada. Correo electrónico: u2903290@unimilitar.edu.co



Objetivo general

Realizar un análisis de tendencia al consumidor en la compra de ropa masculina para determinar la viabilidad comercial de una actividad económica, considerando el perfil del consumidor, la estructura del mercado y las características de la empresa.

Objetivos específicos

- Comprender el marketing industrial orientado a resaltar las prestaciones técnicas del producto en relación con su precio de venta.
- Relacionar fortalezas y debilidades con respecto a oportunidades y amenazas para buscar estrategias en el desarrollo de la venta y asesorar al cliente en el vestir.
- Establecer los parámetros que ayuden a relacionar costes, producto, comunicación y distribución.
- Generar un análisis de tendencia al consumidor en la compra de ropa masculina que permita planear una estructura financiera, organizacional y estratégica en la empresa.

Metodología

- Realizar la revisión bibliográfica de una actividad económica, su relación con posicionamiento empresarial y pautas a tomar en cuenta para desarrollar un análisis de tendencia al consumidor.
- Definir conceptos claves orientados al marketing industrial considerando aspectos organizacionales.
- Explicar características o aspectos actuales de las tiendas de ropa masculina.
- Determinar estrategias que hagan a un modelo de negocio estructurado y rentable.
- Análisis de información obtenida a lo largo de la investigación para desarrollar un boceto claro y conciso.
- Presentar una propuesta estructurada que una compañía debe tener en cuenta para desarrollar una idea de tendencia al consumidor en la industria textil.

Marco teórico

El marketing es un proceso social y administrativo

Se considera un *proceso social* porque intervienen grupos de personas, con necesidades, deseos y demandas. Según Kotler, “el punto de partida de la disciplina del marketing radica en las necesidades y deseos humanos”.

Además, se considera un *proceso administrativo*, porque el marketing necesita de sus elementos básicos, como son: la planeación, la organización, la implementación y el control, para el desarrollo de sus actividades.



Ambas características básicas forman parte de la *definición de marketing*, y ayudan a recordar dos puntos muy importantes: 1) El marketing es realizado por personas y dirigido hacia personas (proceso social): este aspecto es fundamental para no perder de vista la “humanización” de sus distintas actividades. 2) El marketing necesita ser administrado: hoy en día no es suficiente tener ideas brillantes, hay que planificarlas, organizarlas, implementarlas y controlarlas, para de esta manera, incrementar las posibilidades de éxito y que la empresa sea más competitiva (Marketing-Free.com, s.f.)

¿Qué es un análisis de mercado?

En el término más básico, un análisis de mercado es un estudio de:

- Un problema en particular o una oportunidad de mercado.
- Las necesidades de un mercado objetivo que requiere de solucionar un problema o una oportunidad.
- Ideas para el mercadeo de un producto en particular o un servicio que satisfaga las necesidades de un mercado objetivo.

¿Cuándo se debe de realizar un análisis de mercado?

- Cuando se está iniciando un negocio.
- Cuando se está entrando a un mercado nuevo.
- Cuando este usted considerando agregar un producto nuevo o servicio.

¿Porque debe usted realizar un análisis de mercado?

- Para minimizar el riesgo de su negocio.
- Para entender los problemas y las oportunidades.
- Para identificar las oportunidades de ventas.
- Para planificar su mercadotecnia/o mensaje de venta.

Segmentos de mercado

Segmentar significa dividir el mercado en grupos homogéneos y diferenciados, ya que cada segmento tiene su propio perfil de consumidor que describe sus características específicas.

Para segmentar el mercado podemos utilizar alguno de los siguientes criterios:

- Geográfico. División del mercado por la ubicación geográfica de los clientes: por calles, barrios, zonas, municipios, poblaciones, islas, regiones, países, continentes, etc.
- Demográfico. División del mercado por las características demográficas de los clientes: edad, sexo, estado civil, número de hijos, etc.
- Socioeconómico. División del mercado por las características socioeconómicas de los



clientes: clase social, nivel de estudios, poder adquisitivo, etc.

- Psicográfico. División del mercado por las características psicográficas de los clientes, sus comportamientos, hábitos, estilos de vida, etc.

Una vez identificados los distintos segmentos de nuestro mercado, podemos analizar sus características, sus comportamientos y sus hábitos de consumo. El objetivo es, en definitiva, identificar las necesidades particulares de cada grupo. Cada segmento a su vez se puede dividir en subgrupos más pequeños llamados nichos de mercado. (Cámara Santa Cruz de Tenerife, s.f.)

Segmentación según B2C

La segmentación de mercado divide un mercado en grupos uniformes más pequeños de compradores que tienen diferentes necesidades, características y comportamientos que requieren estrategias o mezclas de marketing diferenciadas.

En la estrategia de *Business to Consumer* “B2C”, se apela directamente al consumidor, es decir, el producto o servicio va dirigido al cliente final.

Mientras la estrategia de segmentación está relacionada con el nivel de personalización de la oferta, y la forma en que la empresa atenderá a sus clientes, los criterios de segmentación se refieren a las variables a través de las cuales se seleccionarán los grupos homogéneos.

La siguiente figura resume los criterios que Kotler y Armstrong (2010), y Brest (2007), proponen para segmentar el mercado.

Figura 1

Variable	Mercados B2C	Geográfico	Demográfico	Psicográfico	Conductual
Decisor de compra	Persona individual o familia como unidad de compra.	<ul style="list-style-type: none"> • Región del mundo • País • Ciudad • Densidad poblacional (rural, urbano, etc.) • Clima 	<ul style="list-style-type: none"> • Edad • Género • Tamaño de la familia • Ciclo de vida familiar • Generación • Ingresos • Ocupación • Educación • Religión • Raza • Nacionalidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Personalidad • Estilo de vida • Intereses • Opiniones • Actividades • Valores • Clase Social 	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de uso: no usuarios, light, medio, heavy • Lealtad de marca • Beneficios buscados • Estatus de usuario (potencial, primera vez, regular, etc.) • Disponibilidad de compra • Ocasiones: días festivos y eventos que estimulan la compra (navidad, día del cariño, etc.)
Volumen en la transacción	Para consumo personal.				
Concentración geográfica	Puede no existir concentración del mercado en una zona geográfica definida.				
Tipo de compra	Puede ser por impulso o no planificada.				
Estrategias de comunicación	Generalmente se hace mayor énfasis en publicidad y promoción.				
Especificaciones técnicas	Generalmente las compras no requirieren conocimientos técnicos avanzados sobre los productos/servicios.				

Fuente: basado en Kotler y Armstrong (2010) y Best (2007).

Fuente: Universidad Rafael Landívar (2014).



Nicho de mercado

Según Philip Kotler, “un nicho de mercado es un grupo con una definición más estrecha (que el segmento de mercado). Por lo regular es un mercado pequeño cuyas necesidades no están siendo bien atendidas.”

Complementando esta definición, el *nicho de mercado* (a diferencia de los *segmentos de mercado* que son grupos de mayor tamaño y de fácil identificación), es un grupo más reducido (de personas, empresas u organizaciones), con necesidades y/o deseos específicos, voluntad para satisfacerlos y capacidad económica para realizar la compra o adquisición.

Características del nicho de mercado

Es la fracción de un segmento de mercado: es decir, cada *nicho de mercado* presenta algunas particularidades que la distinguen de otros nichos o del segmento en su conjunto. Por ejemplo: las personas que utilizan el transporte aéreo para desplazarse a un lugar distante, representan un segmento de mercado. Por su parte, las personas que además de viajar en avión eligen la “clase ejecutiva”, representan un “nicho de mercado”.

Es un grupo pequeño: lo componen personas, empresas u organizaciones en una cantidad reducida (comparándola con el segmento de mercado al que pertenece). Por ejemplo, el número de ejecutivos o personas que eligen la “clase ejecutiva” en un vuelo de avión, es mucho más reducido que la cantidad de personas que viajan en la “clase turista”.

Tienen necesidades o deseos específicos y parecidos: por lo general consisten en necesidades o deseos muy particulares, y que, además, tienen su grado de complejidad; por lo cual, este grupo está dispuesto a pagar un “extra” para adquirir el producto o servicio que cumpla con sus expectativas. Por ejemplo, las personas que eligen la “clase ejecutiva” en los vuelos de avión, tienen requerimientos muy especiales, como ser: más espacio para estirar las piernas, asientos más cómodos o acolchados, un menú de comida y bebida más selecto, personal más calificado en atenderlos, música, video, almohadas especiales, etc.

Existe la voluntad para satisfacer sus necesidades o deseos: presentan una “buena predisposición” por adquirir un producto o servicio que satisfaga sus expectativas, y en el caso de las empresas u organizaciones, tienen la “capacidad de tomar decisiones de compra”. Por ejemplo, las personas que viajan en “clase ejecutiva” solicitan su pasaje para esa categoría de viaje, incluso sin necesidad de que el personal de la línea aérea se lo sugiera.

Existe la capacidad económica: cada componente del “nicho de mercado” tiene la suficiente capacidad económica que le permite incurrir en los gastos necesarios para obtener el satisfactor de su necesidad o deseo. Incluso, están dispuestos a pagar un monto adicional (al promedio) por lograr una mejor satisfacción. Por ejemplo, las personas que eligen la “clase ejecutiva” en cualquier línea aérea, tienen la suficiente fluidez económica como para pagar un monto extra por darse ese lujo.



Requiere operaciones especializadas: Al existir necesidades o deseos con características específicas e incluso complejas, el “nicho de mercado” requiere de proveedores especializados y capaces de cubrir sus expectativas. Por ejemplo, los clientes de “clase ejecutiva” esperan que las líneas aéreas les proporcionen una ventanilla exclusiva donde no tengan que hacer fila, un espacio más cómodo en la sala de espera, personal calificado para atenderlos, membresías especiales, tarjetas de cliente ejecutivo, etc.

Existen muy pocas o ninguna empresa proveedora: En aquellos “nichos de mercado” donde las particularidades y la complejidad de sus necesidades o deseos requieren de una alta especialización, es normal que no existan más de una o dos empresas proveedoras, incluso puede darse que no exista ninguna.

Tiene tamaño suficiente como para generar utilidades: Según Kotler, “un *nicho de mercado* ideal es aquel que tiene el tamaño necesario como para ser rentable” (Promonegocios, 2005).

¿Qué es la mezcla de mercadotecnia?

Kotler y Armstrong, definen la mezcla de mercadotecnia como:

El conjunto de herramientas tácticas controlables de mercadotecnia que la empresa combina para producir una respuesta deseada en el mercado meta. La mezcla de mercadotecnia incluye todo lo que la empresa puede hacer para influir en la demanda de su producto.

Por su parte, el Diccionario de Términos de Marketing de la American Marketing Association, define a la mezcla de mercadotecnia como aquellas variables controlables que una empresa utiliza para alcanzar el nivel deseado de ventas en el mercado meta.

En síntesis, la mezcla de mercadotecnia es un conjunto de variables o herramientas controlables que se combinan para lograr un determinado resultado en el mercado meta, como influir positivamente en la demanda, generar ventas, entre otros.

¿Cuáles son las herramientas o variables de la mezcla de mercadotecnia?

A mediados de la década de los 60, el Dr. Jerome McCarthy (premio Trailblazer de la American Marketing Association) introdujo el concepto de las 4 P, que hoy por hoy, se constituye en la clasificación más utilizada para estructurar las herramientas o variables de la mezcla de mercadotecnia.

Las 4 P consisten en: Producto, Precio, Plaza (distribución o punto de venta) y Promoción.

Producto: es el conjunto de atributos tangibles o intangibles que la empresa ofrece al mercado meta. Un producto puede ser un bien tangible (p. ej.: un auto), intangible (p. ej.: un servicio de limpieza a domicilio), una idea (p. ej.: la propuesta de un partido político), una persona (p. ej.: un candidato a presidente) o un lugar (p. ej.: una reserva forestal). El “producto” tiene a su vez su



propia mezcla o mix de variables: variedad, calidad, diseño, características, marca, envase, servicios, garantías.

Precio: se entiende como la cantidad de dinero que los clientes tienen que pagar por un determinado producto o servicio. El precio representa la única variable de la mezcla de mercadotecnia que genera ingresos para la empresa, el resto de las variables generan egresos. Sus variables son las siguientes: precio de lista, descuentos, complementos, periodo de pago, condiciones de crédito.

Plaza: también conocida como posición o distribución, incluye todas aquellas actividades de la empresa que ponen el producto a disposición del mercado meta. Sus variables son las siguientes: canales, cobertura, surtido, ubicaciones, inventario, transporte, logística.

Promoción: abarca una serie de actividades cuyo objetivo es: informar, persuadir y recordar las características, ventajas y beneficios del producto. Sus variables son las siguientes: publicidad, venta personal, promoción de ventas, relaciones públicas, telemarketing, propaganda (Thompson, 2005).

Planograma

Para abordar la planogramación, se estudian distintas cuestiones que guían la elaboración del planograma. Teniendo en cuenta que el planograma es una herramienta para lograr la mejor disposición del surtido, se estudia, en primer lugar, el surtido, su estructura, sus dimensiones, sus datos cuantitativos y su gestión óptima. Las estrategias de merchandising del surtido son objeto de estudio, diferenciando estrategias de localización en el punto de venta y de presentación en el lineal.

También se analizan los planogramas como herramienta del merchandising en los supermercados, profundizando en los efectos positivos sobre el resto de las áreas de la empresa, su función estratégica y sus tipos. Finalmente, se aborda la planogramación en la empresa. Se profundiza en el desarrollo de esta labor en la práctica empresarial. Los trabajadores encargados de la planogramación siguen unas guías de implantación marcadas por la empresa y unos criterios generales de la misma (Lobato, 2016).

Venta cruzada

Existen dos populares estrategias de ventas para incrementar la compra promedio de un cliente: la venta incremental y la venta cruzada. La venta incremental o *up-selling* es cuando se vende una versión más costosa del mismo producto o servicio; mientras que la venta cruzada o *cross-selling* es vender productos diferentes complementarios o adicionales.

La venta cruzada o *cross-selling* es una estrategia para incrementar las ventas, promoviendo productos o servicios complementarios para aumentar la transacción promedio. El ejemplo más común es el de las comidas rápidas, donde después de haber ordenado un combo de hamburguesa la persona le ofrece si lo desea con papas y gaseosa agrandadas (esto sería *up-selling*



porque está incrementando el valor del producto existente: papas y gaseosa), o si desea complementar su orden con un helado de postre (este sería *cross-selling* porque le está ofreciendo un producto complementario a lo que ya compró).

Estimular la venta cruzada es una forma simple de incrementar las ventas, se enfoca en venderles a los clientes actuales, aquellos que ya lo conocen y confían en su negocio, algo mucho más probable que pretender venderle a alguien algo por primera vez. Y extrapolando el ejemplo de las comidas rápidas, usted podría implementar en su propio negocio una sencilla estrategia de venta cruzada para aumentar los ingresos, pues existe una alta probabilidad de que la mayoría de sus clientes no conozcan todo lo que tiene para ofrecerles.

La mayoría de los clientes no conocen su portafolio completo, usualmente le compran uno o dos productos, sin saber que usted podría proveer otras cosas (*venderle* otras cosas). Se sorprenderá de las ventas adicionales que puede lograr solo por contarle a su cliente que además de personal temporal para *call center*, también ofrece promotoras para punto de venta y servicios de merchandising.

Recuérdelos a sus clientes lo que vende, no presuma que, porque han sido clientes por mucho tiempo, conocen a fondo su portafolio.

Haga visible lo invisible

Haga más visibles los productos menos populares. Usualmente nos enfocamos en promover los productos que más se venden, sin capitalizar el potencial es de los que, si bien se venden mucho menos, pueden ser mucho más rentables. Estos productos son una gran oportunidad porque aportan una alta rentabilidad al negocio al estar en mercados menos competidos o desatendidos por la competencia.

Cuando vemos las ventas por producto/servicio o línea, usualmente nos encontramos con una alta concentración en unos pocos. Son los llamados Pareto, aquellos que hacen el 80 % de la venta total del negocio (Gómez, 2014).

Análisis de la demanda

Se entiende como demanda a la cantidad de bienes y servicios a los cuales un cliente o comprador intenta adquirir en un mercado y es por medio de la ley de demanda que se determina que al subir el precio de estos bienes o servicios su demanda disminuye, sin embargo, la variación en la cantidad de bienes y servicios demandados no se mueven en forma lineal a la variación de sus precios.

Cuando se analiza la demanda se busca determinar y medir todas aquellas fuerzas que puedan llegar a afectar los requerimientos de un mercado determinado, con respecto a un bien o servicio prestado por este. De igual manera se busca determinar las posibilidades de la participación de un producto del proyecto con mira a la satisfacción de dicha demanda. La necesidad real del bien o servicio, precio, nivel de ingreso de la población, entre otros factores, son componentes que hacen parte de la función que desarrolla la demanda.



La demanda, o Consumo Nacional Aparente (CNA) se entiende también como la cantidad de determinado bien o servicio que el mercado requiera, y se puede expresar como:

$\text{Demanda} = \text{CNA} = \text{producción nacional} + \text{importaciones} - \text{exportaciones}$.

Variables de la demanda

Ingreso promedio: al aumentar el ingreso de los consumidores la demanda por un bien va a aumentar y viceversa.

Tamaño del mercado: al aumentar la población es de esperar que la demanda por un bien aumente, ya que existe mayor número de consumidores con la misma necesidad.

Gustos y preferencias: al aumentar las preferencias por un bien (moda, temporada) la demanda de este va a aumentar.

Precios futuros esperados: si se espera que el precio de un bien aumente a un cierto plazo, la demanda inmediata de este bien va a aumentar. Por otra parte, si se espera que el precio disminuya en el futuro la demanda va a disminuir ahora, pues la gente pospondrá su decisión de compra hasta que el precio baje (Estefanía, 2014).

Oferta

En economía definimos oferta como aquella cantidad de bienes y servicios que los ofertantes están dispuestos a poner a la venta en el mercado a unos precios concretos. Más concretamente, la oferta es la cantidad de bienes y servicios que diversas organizaciones, instituciones, personas o empresas están dispuestas a poner a la venta, es decir, en el mercado, en un lugar determinado (un pueblo, una región, un continente...) y a un precio dado, bien por el interés del oferente o por la determinación pura de la economía. Los precios no tienen por qué ser iguales para cada tipo de productos e incluso en un mismo producto, dos oferentes diferentes pueden decidir poner un precio diferente.

En cualquier sistema económico, ya sea de economía planificada o libre mercado, la oferta juega un papel fundamental en la determinación del precio, ya que es la interacción de esta con la demanda en ese momento la que podrá trasladar al precio la cuantificación y valoración de los productos y servicios a las necesidades de los demandantes (Pedrosa, 2015).

Variables del visual merchandising

Paleta de color: es fundamental seleccionar una paleta de color acorde con la temática del proyecto e identidad visual del mismo, es altamente recomendable no manejar más de cuatro colores en una propuesta de comunicación visual, tenga en cuenta la psicología del color y su valor connotativo y denotativo. No olvide que los colores más elegantes son el blanco y el negro. Conceptos como alto contraste son fundamentales en una propuesta visual debido a que permiten generar una buena legibilidad de los contenidos visuales. Usar colores vivos como rojo y amarillo funcionan bastante bien para resaltar elementos importantes dentro de una propuesta.



Tipografía: esta variable es esencial en el proceso de creación de una línea gráfica sólida. Se recomienda manejar no más de dos tipografías dentro de una propuesta: una para títulos y subtítulos y otra para textos preferiblemente de la misma familia tipográfica. Si tiene muchas tipografías es muy complicado de entender qué es lo que se dice y en qué orden está.

Recuerden que no estamos diseñando para nosotros sino para las personas que están observando nuestra propuesta. El texto debe ser puesto de manera estratégica preferiblemente solo palabras claves y tratar de evitar bloques. La idea es que el expositor se apoye en los recursos visuales y el texto le permita recordar elementos claves, es fundamental no leer de los slides o de los recursos visuales.

Diagramación: las formas que utilizamos en el fondo de la propuesta de comunicación visual son importantísimas. No es tener un mismo fondo como si fuera una plantilla y repetirlo, si no seleccionar formas ya sea geométricas u orgánicas que permitan desarrollar la identidad visual de la propuesta. A su vez no debe haber 2 slides con la misma forma de fondo, si no que cada uno debe ser único; esto con el fin de afianzar la identidad visual de la propuesta en el subconsciente del receptor.

Fotografía, ilustración y pictogramas: esta variable es la más importante y la que genera mayor grado de identidad visual dentro de una línea gráfica. Se pueden trabajar una, dos o las tres variables dentro de una propuesta de comunicación visual, depende del estilo que se esté manejando, permite potencializar de manera gráfica las fortalezas de la propuesta e ideas de negocio (Huertas, 2017).

Elasticidad (economía)

La elasticidad es una medida de la sensibilidad de la cantidad demandada de un bien ante un cambio en su precio. La elasticidad busca medir el impacto, o el grado de las variaciones de las demandas o las ofertas de los productos dadas diversas variaciones de precios.

Los productos elásticos

Son aquellos que dependen mucho de la oferta y la demanda, cuando el costo es elevado hay menos consumo y el precio es más alto, es por eso por lo que la mayoría de los artículos de lujo son considerados bienes o productos elásticos.

Demanda elástica

- Boletos de avión productos perecederos.
- Autos de lujo.
- Servicio de tv de paga.

Los bienes inelásticos

Son aquellos que por la naturaleza de su necesidad son poco sensibles a la oferta y la demanda, entre la mayoría de estos bienes se encuentran los productos más básicos, como la leche, el huevo, el transporte público etc.



Oferta inelástica

- Productos de canasta básica.
- Productos perecederos.
- Calzado y vestido (sin contar moda) (Elasticidad, demanda y oferta, s.f.).

Desarrollo

Problema que se quiere estudiar

En la actualidad existen infinidad de segmentaciones dependiendo los gustos e intereses de cada persona, pero, ¿cómo se debe llegar a un nicho de mercado en particular? ¿Qué aspectos influyen en las decisiones del consumidor al momento de comprar?

Almacenes de ropa en la actualidad cuentan con una estructura financiera, organizacional y estratégica donde por medio de actividades llevan a flote aspectos económicos y administrativos de la compañía.

Analizar la situación actual

Enfocándose en la industria textil, una marca de ropa en específico la cual cuenta con prendas y artículos que para ser adquiridos por el público deben pagar una suma de dinero considerable, lo primero que se deduce es que la persona que compre ahí es porque tiene ingresos suficientes, le gusta la moda, considera que la exclusividad es importante y cree que el posicionamiento de la marca influye en su vestir diario. Una propuesta de análisis de tendencia al consumidor facilita este tipo de interacción con el cliente, desarrollaría una estructura compacta del objetivo de la compañía y no se improvisaría al respecto.

Segmentación B2C

La segmentación B2C pretende relacionar la manera de vender y el cómo llegar al cliente, donde se deben tener en cuenta variables.

- Decisor de compra: la unidad de compra será una persona en específico o una familia.
- Volumen en la transacción: se debe tener en cuenta que el adquirir un producto será exclusivamente para uso personal.
- Tipo de compra: podrá generarse por impulso o sin planificación y no se enfoca en vender en masa, sin embargo, por los elevados costos en ocasiones se verán compras previamente pensadas por parte de los clientes buscando artículos específicos.
- Estrategias de comunicación: se debe hacer énfasis en publicidad, promoción y exclusividad, puesto que el cliente se ve atraído por esto, no obstante, el visual merchandising es la primera impresión que se llevarán las personas.
- Especificaciones técnicas: generalmente este tipo de compras no requieren conocimientos técnicos avanzados sobre los productos, pero es indispensable aclararle



al cliente no frecuente que el costo de cada artículo se ve retribuido en la calidad, exclusividad, confección y servicio brindado.

Una vez teniendo claras las variables anteriores se puede proceder a responder los siguientes criterios necesarios para introducir un nuevo producto o servicio al mercado para la industria textil:

Geográficamente: ciudad de Bogotá, Colombia (nororiente) clima templado, frío.

Demográficamente: personas entre 16 y 40 años, enfocado al género masculino con educación bachiller o profesional, ingresos mensuales superiores a 3 SMMLV, ocupación empresarial del cliente, sin importar religión, raza y nacionalidad.

Psicográficamente: las prendas encontradas allí serán para jóvenes o señores que tengan un estilo de vida empresarial, donde busquen siempre sentirse bien con su vestir pero que no pierdan elegancia ni etiqueta, su estatus social debe ser medio-alto puesto que las prendas y artículos son relativamente costosos.

Conductualmente: el alto costo de los artículos encontrados allí será un impedimento para no desarrollar ventas progresivamente, donde la disponibilidad de compra del consumidor será un aspecto fundamental, por lo que se deberá contar con asesores en moda que impulsen la venta, con la buena atención personalizada se buscará fidelizar los clientes. A pesar de que la marca será para consumidores de toda clase, su mayor recaudación será por parte de clientes potenciales y regules. Por lo anterior, se dispone apertura de domingo a domingo con horarios flexibles para los empleados. Al ser ropa masculina los eventos que estimulan la venta son el día del padre y temporada navideña.

Nicho de mercado

En la medida que una empresa produce y vende, esta subdivide el mercado en cada una de las características más singulares o distintas, por lo que se puede afirmar que los segmentos pueden abarcar un conjunto de nichos.

El nicho de mercado presenta las siguientes características:

Fragmento de un segmento de mercado: esta marca se enfoca en ropa masculina, pero más allá de ello, Carlos Nieto en la industria nacional, además de la tradición y elegancia, brinda un excelente servicio de asesoría al cliente. Es importador directo y exclusivo de materias primas e insumos de alta gama, comercializando prendas diseñadas y elaboradas por mano de obra colombiana.

Grupo reducido: Carlos Nieto mira y retribuye todos sus diseños exclusivos hacia el hombre colombiano, donde vestirse bien, sentirse seguro y portar tradición y moda moderna definen al caballero Carlos Nieto.

Necesidades o deseos específicos: vestirse es una necesidad, pero lucir un vestuario moderno no tanto, por eso esta marca colombiana a base de servicio, posicionamiento, calidad, visual



merchandising y demás aspectos vuelve un deseo en una necesidad sin importar tener que pagar algo adicional, puesto que el cliente se educa en el buen vestir.

Voluntad para satisfacer necesidades: por una parte, para el cliente Carlos Nieto no es necesario sugerirle algo, ya tiene un conocimiento previo de lo que quiere adquirir, entonces es difícil cambiar su opinión, simplemente será por parte del asesor seguir la venta y apoyarlo en lo que necesite, no obstante hay casos en los que el asesor de moda juega un papel fundamental porque existirá indecisión o duda en lo que desea la persona, es ahí donde proponer y aconsejar por parte del empleado impulsará la venta.

Capacidad económica: en ocasiones lo que para unos es un lujo para otros se convierte en una necesidad, y en eso se encaminará la venta, en demostrarle al cliente que necesita adquirir el producto porque es una exigencia para su rutina diaria o porque además de ser una prenda de ropa representa diseño, exclusividad, calidad y tendencia en moda.

Planteamiento de la DAFO del marketing. D: debilidades, A: amenazas, F: fortalezas y O: oportunidades

Amenazas y oportunidades: características externas. Debilidades y fortalezas: características internas.

Tabla 1

Debilidades <ul style="list-style-type: none"> ● Costos elevados ● Volumen de producción ● Jornada extensa ● Tiempo de compra 	Oportunidades <ul style="list-style-type: none"> ● Incrementar ingresos en temporada navideña y día del padre ● Satisfacer la necesidad del cliente ● Reconocimiento a nivel nacional
Amenazas <ul style="list-style-type: none"> ● Nuevos competidores ● Impuestos altos ● Inestabilidad del mercado ● Actual coyuntura económica y social 	Fortalezas <ul style="list-style-type: none"> ● Equipo de trabajo con experiencia ● Exclusividad ● Confeción nacional ● Materia prima importada ● Atención personalizada ● Ubicación estratégica ● Imponer tendencias en moda

Fuente:elaboración propia.

Competencia

Inditex S. A., acrónimo de *Industria de Diseño Textil, Sociedad Anónima*, es un grupo multinacional español de fabricación y distribución textil. Tiene su sede central en el Polígono Industrial de Sabón, en Arteixo, La Coruña, España.



Inditex tiene en nómina a más de 152.000 empleados y opera más de 7.000 tiendas en los cinco continentes, bajo las marcas principales de Zara, Zara Home, Massimo Dutti, Pull & Bear, Bershka, Oysho, Uterqüe, Lefties y Stradivarius.

- Zara: es la marca principal de la cadena. Abarca estilos muy diferentes, desde la ropa de diario, más informal, hasta la más seria o formal, pasando por vestidos y trajes de fiesta para eventos. Trabaja la moda para mujer, hombre y niño.
- Zara Home: se especializa en artículos para vestir y decorar la casa. Su apuesta por el textil se complementa con productos como vajillas, cuberterías, cristalerías y objetos de decoración.
- Bershka: el estilo de las tiendas Bershka es juvenil e informal, con imagen vinculada a la música, las tendencias y las nuevas tecnologías para el público entre 13 y 25 años.
- Stradivarius: en el grupo Inditex, es una de las marcas que más impulso ha tenido en los últimos años. Está dirigida al público femenino joven.
- Pull and Bear: es la marca joven del grupo gallego.
- Massimo Dutti: destaca por sus diseños más clásicos, tanto de diario como formal, y trajes, vestidos de noche, de cóctel.
- Oysho: lencería y ropa interior femenina del grupo Inditex es una de las marcas que más crece y también gana cuerpo en la estrategia en línea de la compañía.
- Uterqüe: es la última firma del grupo Inditex en incorporarse, especializada en complementos y accesorios de moda.
- Tempe: la empresa de calzado del grupo Inditex. Desde su centro internacional en Elche, Alicante, se diseña y distribuye el calzado que acompaña la moda de todas las marcas.
- Lefties: Lefties es una cadena española de tiendas de moda (*low cost*) perteneciente al grupo Inditex que trabaja la moda para mujer, hombre y niño. Nació en 1999, tiene 127 tiendas y desde 2014 opera fuera de España.

Por otro lado, Carlos Nieto es la única marca premium colombiana en el segmento de moda masculino con 40 años de trayectoria. Pionera en el desarrollo de propuestas innovadoras para un selecto y exigente grupo de clientes.

La marca sigue comprometida con la industria colombiana, además de la tradición y elegancia, brinda un excelente servicio de asesoría. Es importador directo y en exclusiva de materias primas e insumos de alta gama (Italia, España, Portugal e Inglaterra), comercializando prendas diseñadas por talento y mano de obra colombiana.

Actualmente, cuenta en el mercado colombiano con 20 puntos de venta, dos concesiones y 3 tiendas en franquicia fuera del país, ofreciendo siempre artículos muy bien confeccionados, sello que ha caracterizado a la marca a lo largo de estos años (Carlos Nieto Moda, s.f.).

Las dos marcas se caracterizan por su elegancia y tendencia en moda masculina, la materia prima es europea, siendo textiles de alta gama a un precio asequible.



Relacionar cómo influye la forma de hacer el planograma en que una marca venda más o menos

La planimetría es una estrategia de comunicación con el consumidor utilizada en los puntos de venta, ya que se logra atraer al comprador al sitio de venta y cautivar con los productos. La imagen en este aspecto juega un papel fundamental y más si se ubica dentro en una vitrina o exhibición, ya que es una estrategia comunicacional directa con el consumidor, debido a que lo que se busca es mostrar la personalidad de la marca.

La planimetría busca llegar al cliente de manera visual, emocional y organizativa creando un vínculo comunicacional con él, es decir, muchas veces se puede afirmar que un establecimiento no vende no porque su producto sea malo o poco atractivo, sino porque hay que impulsarlo de manera visual, siempre la imagen percibida será el primer impulso para desarrollar una venta. La organización de prendas y artículos, los colores del punto de venta y el atuendo del vendedor darán la primera impresión hacia el cliente.

La conectividad y la participación son los factores claves para transformar las marcas en experiencias de compra, ya que considera que, gracias al diseño, una marca se puede acercar al corazón de sus clientes y, por ende, hace que la marca esté en el top of mind. (Revista Dinero, 2008)

Un factor primordial es la creatividad e innovación, a veces ser recursivo y mostrar los artículos de una manera distinta a como los muestran los demás, atraerá al consumidor asegurando ventas o en el peor de los casos crea incertidumbre para que en algún momento el cliente se vea animado a entrar al establecimiento y cotizar algún producto. Actualmente Carlos Nieto cuenta con un diseño de planimetría en el que busca que el cliente se sienta de la misma manera en todos los almacenes, la organización, la distribución del espacio, vestimentas y exhibiciones deben ser similares siempre. Sin embargo, hay que considerar el hecho de que no todos los almacenes tienen la misma área, pero se busca mantener este rasgo, que identifica a la marca. Por otro lado, Massimo Dutti cuenta con un amplio espacio, que permite al público desplazarse dentro del almacén de manera tranquila y ordenada, a pesar de que no todos los establecimientos son igual de grandes, en comparación a Carlos Nieto, tienen una mayor libertad con respecto a la ubicación de todos los artículos dentro del lugar.

Análisis de la demanda

Precio del bien. El costo de cada artículo es importante para el consumidor, pero el cliente frecuente de Carlos Nieto sabe o tiene presupuestado el valor del bien, por lo que es más destacada la calidad, exclusividad y servicio brindado por la marca.

Un traje Carlos Nieto promedio se encuentra en 1.198.990 COP, paño súper 130 en adelante, confección europea. Por otro lado, un traje Massimo Dutti 100 % lana se encuentra promedio \$1.199.000 COP. Esta relación ayuda a determinar que el bien sustituto de una prenda se encuentra en la otra marca, donde el consumidor recurrente notará que las dos marcas conservan



moda, materia prima, diseño, tendencia y exclusividad, donde el cliente se ve atraído más por el servicio, el posicionamiento y la curva de tallas.

Partiendo de que si la cantidad demandada cambia notablemente con una alteración minúscula en el precio del bien, se tiene una demanda elástica, se identifica que Carlos Nieto tiene una demanda elástica, debido a que si aumenta o disminuye poco considerable el precio de un bien, el volumen de ventas no se verá afectado, debido a que la marca la mueve el cliente recurrente y potencial que ya conoce el catálogo de precios.

Preferencias del consumidor. El comportamiento de los demandantes es determinado por sus gustos, preferencias y precios. En Carlos Nieto se identifican tres tipos de clientes; por un lado hay clientes recurrentes que no compran en grandes cantidades, pero consideran que de vez en cuando una prenda de lujo es importante en su clóset, está la persona que solo compra en ocasiones especiales e importantes, porque disfrutar de prendas exclusivas marca la diferencia, y el caballero Carlos Nieto es el que convierte el lujo en una necesidad, porque sabe que lo que adquiere es exclusivo y no toda la población tiene acceso a ese bien pero lo vuelve una exigencia en su vida.

Tabla 2

Carlos Nieto	Massimo Dutti
Predomina el color azul y gris, con luces amarillas	Predomina el color negro, gris, secciones cafés y luces amarillas
Azul brinda tranquilidad, seguridad, libertad, confianza.	Negro brinda elegancia, autoridad, fuerza, sobriedad, poder.
Prendas exhibidas por colección en degradé, sin embargo, algunos artículos son ordenados por talla y luego colores	La organización va por colección sin importar tallas, difícil y tedioso encontrar una talla específica.
Busca atraer al cliente con vitrinas llamativas e innovadoras	Vitrinas poco elaboradas, solo busca exhibir el producto en maniqués
No se expone el precio a primera vista, deja incertidumbre para que el comprador pregunte y sea atraído al establecimiento.	Colocan precio de prendas expuestas en maniqués.
Las prendas no tienen pin, dificulta el control de inventario.	Las prendas no tienen pin, dificulta el control de inventario.
Se percata marca olfativa que identifica al almacén sobre los demás, fragancia masculina y que también puede ser adquirida por el público.	No existe fragancia alguna que identifique o atraiga clientes, debido a que el gran catálogo de prendas tanto para mujer y hombre no lo permite. No se puede enfocar en un solo género.
Muy bien identificadas las secciones de verano, casual y formal.	Sección elegante separada de la casual.
El espacio no permite que todos los almacenes tengan dentro más maniqués vestidos, pero reemplazan eso por combinaciones de dos o más prendas.	Dentro del almacén ubican maniqués con vestimentas completas.

Fuente: elaboración propia.



Variables de la demanda

Ingreso promedio: al aumentar el ingreso de los consumidores, la demanda por un bien va a aumentar, por lo que esta relación se ve muy bien reflejada cada inicio de año cuando aumenta el SMMLV en el país y por ende la inflación hace subir todo de precio, sin embargo, cabe destacar que el ingreso promedio de un cliente Carlos Nieto recurrente debe ser mayor a 3 SMMLV.

Tamaño del mercado: por un lado, a pesar de que Massimo Dutti opera en más de 74 países y produce ingresos multimillonarios internacionalmente, tiene un crecimiento anual en ventas del 6 % en Colombia, mientras Carlos Nieto tuvo ingresos mayores a aproximadamente 30 mil millones de pesos en el año 2015, con un crecimiento anual del 9 %, dato que aún se mantiene (Nieto, 2015).

Gustos y preferencias: Carlos Nieto, marca pionera en el desarrollo de propuestas innovadoras para un selecto y exigente grupo de clientes, está comprometida con la industria colombiana, porque además de la tradición y elegancia, brinda un excelente servicio de asesoría. Es importador directo y en exclusiva de materias primas e insumos de alta gama europea, comercializando prendas diseñadas por talento y mano de obra nacional.

Precios futuros esperados: debido a que Carlos Nieto importa toda su materia prima, el precio futuro de cada bien depende del costo de importación.

Variables de la visual merchandising

Tabla 3

Carlos Nieto	Massimo Dutti
Su oferta se centra en el sector de moda masculino.	Cuenta con sección masculina y femenina.
Maneja solo un descuento que se realiza el primer jueves de febrero de cada año, aunque últimamente lo vienen alargando tres o cuatro días.	Tienen temporada de descuentos superiores a 30 días de duración en diferentes épocas del año.
Su inventario es reducido, lo que lo hace tener una oferta más notable para el cliente.	El flujo de personas es más elevado debido al exceso de oferta.
El oferente debe llevar un análisis constante, de si existe exceso de oferta para obtener un equilibrio de mercado.	No depende exclusivamente del comprador masculino.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Como resultado de la investigación se definieron conceptos claves para comprender el marketing industrial orientado a resaltar las prestaciones técnicas del producto en relación con su precio de venta, como lo es segmentación, nicho de mercado, mercadotecnia, venta cruzada, planograma, oferta, demanda, producto elástico e inelástico.



Entre tanto, relacionar fortalezas y debilidades con respecto a oportunidades y amenazas permitió identificar y determinar estrategias como lo es que en temporada se debe aumentar el equipo de trabajo con personas con experiencia para incrementar el volumen de ventas, y por otro lado que el servicio brindado por parte del asesor ayude a fidelizar clientes y que estos no se vayan inconformes por la mala atención ofrecida en el desarrollo de la venta.

Luego de establecer los parámetros que ayudaron a relacionar costos, comunicación y distribución del producto dentro del almacén, se corroboró la noción de que el posicionamiento y prestigio de la marca, el servicio y la calidad del bien representan una gran envergadura en la realización de la venta.

En conclusión, cada criterio, parecer y pensamiento de un oferente es evidencia que ayuda a establecer ideas para generar un análisis de tendencia al consumidor en la compra de ropa masculina para así planear una estructura organizacional y estratégica en la empresa.

Referencias

- Cámara Santa Cruz de Tenerife. (s.f.). *Servicio Creación de empresas*. Servicio Creación de Empresas. Recuperado de <http://www.creacionempresas.com/plan-de-viabilidad/que-es-un-plan-de-empresa-viabilidad/análisis-del-mercado>
- Estefania, C. R. (14 de julio de 2014). *Hispanista*. Recuperado de <http://estefaniacr.blogdiario.com/1405353021/la-demanda-y-sus-variables/>
- Gestiopolis. (s.f.). Recuperado de <https://www.gestiopolis.com/que-son-elasticidad-elasticidad-de-la-demanda-y-de-la-oferta/>
- Gómez, D. (8 de abril de 2014). *Una forma simple de generar venta cruzada*. Bien pensado. Recuperado de <http://bienpensado.com/una-forma-simple-de-generar-venta-cruzada/>
- Huertas, J. (2017). *Resiliente digital*. Recuperado de <http://www.resilientedigital.com/el-poder-de-la-comunicacion-visual/>
- Lobato, A. D. (2016). *Biblioteca Universitaria UVa*. U. D. Empresariales, Editor. Recuperado de <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/21994>
- Marketing-Free.com. (s.f.). *Marketing-Free*. Recuperado de <http://www.marketing-free.com/marketing/definicion-marketing.html>
- Nieto, C. (s.f.). Recuperado de <https://www.carlosnieto.com.co/>
- Nieto, A. (1 de diciembre de 2015). Alberto Nieto en entrevista. *Pulzo TV*. (J. Sáenz, entrevistador) Bogotá, Colombia.



- Pedrosa, S. J. (2015). *Economiapedia*. Recuperado de <http://economipedia.com/definiciones/oferta.html> de 2018, de https://www.youtube.com/watch?v=bFAxhTErB_g
- Promonegocios. (junio de 2005). *Promonegocios.net*. Recuperado de <https://www.promonegocios.net/mercadotecnia/nicho-mercado-que-es.htm>
- Thompson, I. (2005). *La mezcla de mercadotecnia*. Recuperado de http://moodle2.unid.edu.mx/dts_cursos_md/pos/MO/MD/MM/AM/10/Mezcla_de_Mercadotecnia.pdf
- Universidad Rafael Landívar. (2014). *Economía, empresarialidad y desarrollo*. Recuperado de <https://www.url.edu.gt/PortalURL/Archivos/04/Archivos/Revista%20ECO10.pdf#page=89>



Diseño de una herramienta de programación dinámica para la toma de decisiones en escenarios recursivos

Luisa Fernanda Vargas Orjuela²

Resumen

El desarrollo de problemas de programación dinámica es complejo, por lo que se requieren de diversas herramientas que puedan disminuir el tiempo de desarrollo de este. Debido a la gran cantidad de variables, de restricciones, y de alternativas que generan todas las combinaciones posibles de estas, se requiere desarrollar un proceso de programación dinámica. Para dar solución a la problemática definida anteriormente se realizará una herramienta, la cual facilite el proceso de programación dinámica para la toma de decisiones, este proceso estará enfocado a problemas determinados.

Esto se llevará a cabo por medio del uso de Excel y un componente intrínseco de este, el cual recibe el nombre de Visual Basic for Applications (VBA), por lo que se requieren conocimientos acerca del lenguaje de programación de Visual Basic Application, de los procesos de solución en problemas de carga, asignación de recursos y del camino de mínimo costo. (Acosta, 2010)

La herramienta se desarrollará con base a la dinámica con la que se desarrollaría el problema utilizando solo formulas en hojas de cálculo de Excel para posteriormente estandarizar los procesos para los diferentes problemas y las diferentes características de estos.

Para llevar a cabo el diseño de la herramienta se tendrán en cuenta tres tipos de problemas de programación dinámica: asignación de recursos, problemas de carga y camino del costo mínimo; teniendo en cuenta que las variables o condiciones iniciales que serán trabajadas son alternativas variables, alternativas fijas, estado y alternativa cero. (Rodríguez Rojas, 2005)

Para abarcar todos los temas tratados anteriormente, se pretende diseñar una herramienta de programación dinámica utilizando el lenguaje de Visual Basic for Applications, lo que permitirá estandarizar los pasos y el proceso a seguir según el tipo de problema a resolver y las condiciones iniciales las cuales serán establecidas por el usuario.

Palabras clave: problema de carga, asignación de recursos, camino del costo mínimo, programación dinámica.

² Grupo PIT - Producción, Innovación y Tecnología. Universidad Militar Nueva Granada. Correo electrónico: u2902804@unimilitar.edu.co



Introducción

Con el fin de estandarizar la diversidad de variables y restricciones o condiciones que pueden presentarse en un problema de programación dinámica, se diseñará una herramienta por medio del uso de Visual Basic Application. Para el correcto desarrollo de la herramienta se iniciará con las correspondiente revisión bibliográfica acerca de programación dinámica, sus tipos de problemas, cómo se formulan, recursividad y también del uso de Visual Basic Application, posteriormente se deberán definir las condiciones iniciales de los problemas de cargas, problemas de asignación de recursos y del camino de mínimo costos, por medio de esto desarrollar la herramienta definiendo condiciones iniciales de alternativas fijas o variables, estado cero y alternativa cero según sea el caso de cada uno de los problemas. Una vez esto sea definido se determinará el desarrollo de cada uno de los problemas utilizando fórmulas y funciones predeterminadas de Excel. (Obregón, 2015)

Una vez determinado y entendido el funcionamiento que debe tener la herramienta se procederá a realizar la correspondiente programación en VBA, teniendo en cuenta que los datos de entrada y sus posibles resultados deberán ser dinámicos. Cuando sea culminado el proceso anterior deberá realizarse una prueba de cada uno de los problemas para finalmente hacer las modificaciones necesarias y entregar los resultados finales.

Debe recalcar que esta herramienta será diseñada para ser empleada por usuarios o personas que cuenten con conocimientos previos acerca de programación dinámica y manejo de Excel, y por tanto de cada uno de los problemas que serán estandarizados con esta herramienta. (Rodríguez Fuentes & Varona Fernández, 2015)

Metodología

Para llevar a cabo el desarrollo de la herramienta mencionada anteriormente, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Realización de respectiva revisión bibliográfica acerca de programación dinámica, tipos de problemas, recursividad y supuestos para cada uno de los tipos de problemas.
2. Definición de las características de problemas de asignación de recursos, de carga y camino de mínimo costo.
3. Definición de funcionamiento de cada uno de los tipos de problemas en hojas de cálculo de Excel, con uso de fórmulas predeterminadas.
4. Proceso de diseño de herramienta y programación en VBA.
5. Prueba de la herramienta para problemas de asignación de recursos, de carga, y de camino de mínimo costo.
6. Corrección de errores de diseño y programación de la herramienta.
7. Presentación de resultados finales.



Resultados y discusión

Condiciones iniciales

Un requisito necesario para utilizar la herramienta que será generada es la de tener conocimiento previo de la estructura general de los problemas de programación dinámica, para reconocer cuándo un problema se puede resolver por medio de determinados procedimientos y cómo se puede llevar a cabo.

Las condiciones iniciales son determinadas por el usuario y se subdividen en: alternativas variables y alternativas fijas, y estas a su vez pueden contar o no con alternativa y estado cero. El programa realizado podrá desarrollar la solución con base en la función objetivo de minimizar costos o maximizar las ganancias, la dinámica de la función objetivo dependerá del tipo de problema que se requiere desarrollar. La solución o soluciones óptimas resultantes serán generadas aplicando recursividad de retroceso o hacia atrás. (Maurette & Ojea, 2006)

Caracterización de topos de problema

Para definir las características principales de las alternativas y los estados se debe tener en cuenta lo siguiente:

Problema de asignación de recursos: alternativas fijas, no hay alternativa cero y no hay estado cero.

Problema de carga: alternativas variables, hay alternativa cero y hay estado cero.

Problema de camino del mínimo costo: alternativas variables, no hay alternativa cero, no hay estado cero.

Por otra parte, la función objetivo como se ha mencionado anteriormente, también se seleccionará de acuerdo al tipo de problema que se esté trabajando. De acuerdo a lo anterior, si el problema es del camino del mínimo costo la función objetivo será la de minimizar los costos asociados entre cada nodo (alternativa), si es un problema de carga se efectuará la función objetivo de maximizar las utilidades de las diferentes configuraciones de carga total (alternativa) de un producto determinado teniendo en cuenta las restricciones de capacidad, y por último, si es un problema de asignación de recursos se maximizará las ganancias obtenidas según la cantidad de recursos asignados a determinada actividad.



Funcionamiento VBA

Generalidades

La herramienta se compone de tres hojas: datos, operaciones y solución óptima. El usuario primero debe remitirse a la hoja de datos donde deberá seguir las instrucciones consignadas en esta. El problema que se quiera solucionar puede tener un máximo de 30 alternativas.

Figura 1. Hoja de datos. Herramienta de programación dinámica

Debe insertar en esta hoja todos los datos o restricciones, preferiblemente en manera de tabla. El orden de los datos no altera el proceso o las operaciones posteriores.

INSEXTAR

BORRAR

OPERACIONES

SOLUCIÓN ÓPTIMA

Restricciones - capacidad		
producto 1	3	45
producto 2	1	15
producto 3	2	25
capacidad de carga		4 ton

inv. (millones)	PA	PB	PC
1	9	4	6
2	11	8	9
3	14	11	13

Restricciones - DISTANCIA				
	A	B	C	D
A	0	7	8	5
B	7	0	0	0

...
DATOS
OPERACIONES
SOLUCIÓN ÓPTIMA
+
:
<

Fuente: elaboración propia.

Luego de esto, el usuario según el tipo de problema que necesite solucionar deberá oprimir el botón correspondiente al tipo de problema, con base a esto las condiciones iniciales del problema serán generadas por la información que el usuario brinde como datos de entrada a lo largo del proceso. Estas condiciones se declaran en la hoja de operaciones.

Figura 2. Hoja de operaciones. Herramienta de programación dinámica

De usted dependerá la ejecución de cada una de las etapas del problema, para esto deberá utilizar los botones ubicados debajo de este cuadro, en el orden en que se encuentran.

ASIGNACIÓN DE RECURSOS

MÍNIMO COSTO

PROBLEMA DE CARGA

SOLUCIÓN

BORRAR

DATOS

f(x) m²

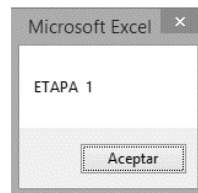
...
DATOS
OPERACIONES
SOLUCIÓN ÓPTIMA
+
:
<

Fuente: elaboración propia.



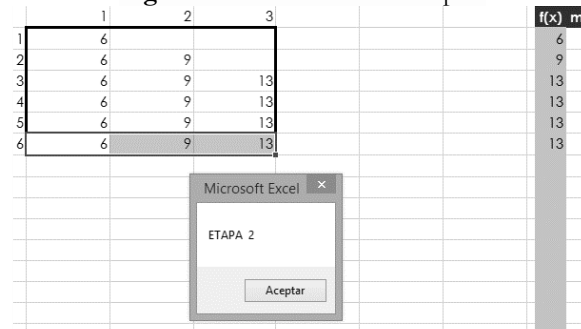
Cada vez que la herramienta inicie los cálculos de una etapa, aparecerá una ventana emergente como indicador de esto (figura 3). Así mismo, el usuario sabrá que la etapa ha finalizado y que la herramienta iniciará con la siguiente, ya que esta lo indicará (figura 4).

Figura 3. Indicador de inicio de operaciones



Fuente: elaboración propia.

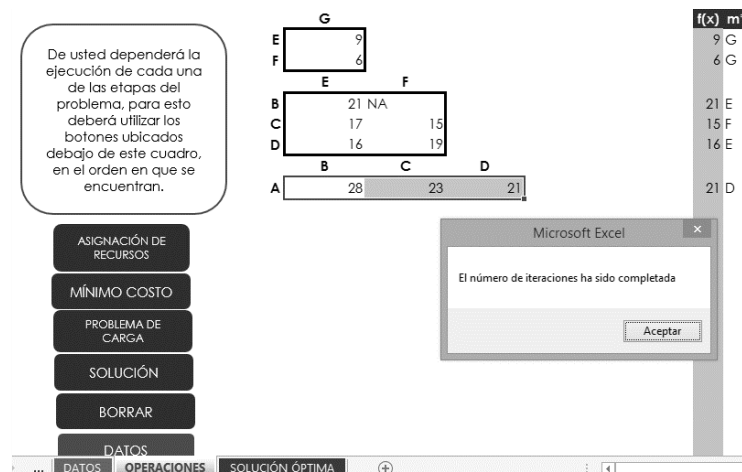
Figura 4. Finalización de la etapa 1



Fuente: elaboración propia

Cuando las operaciones de la totalidad de las etapas se hayan ejecutado, el usuario podrá visualizar la siguiente señal, indicando el valor de la función objetivo en cada una de las etapas y las alternativas óptimas, estas son simbolizadas como $f(x)$ y m^* correspondientemente.

Figura 5. Indicador de finalización de operaciones de todas las etapas

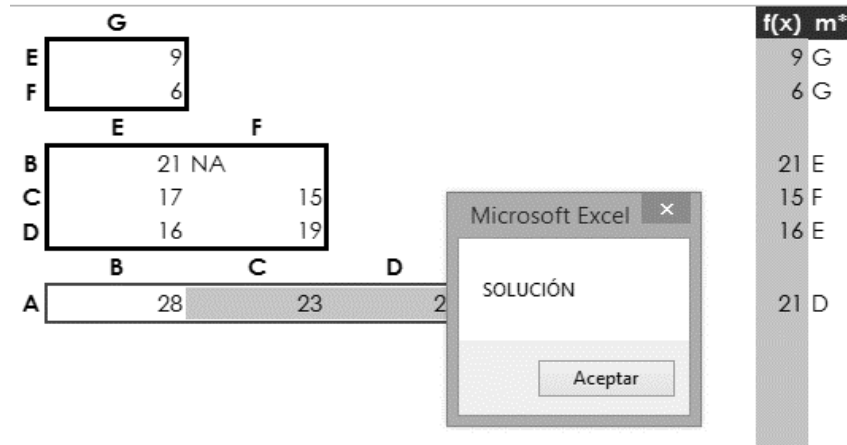


Fuente: elaboración propia.



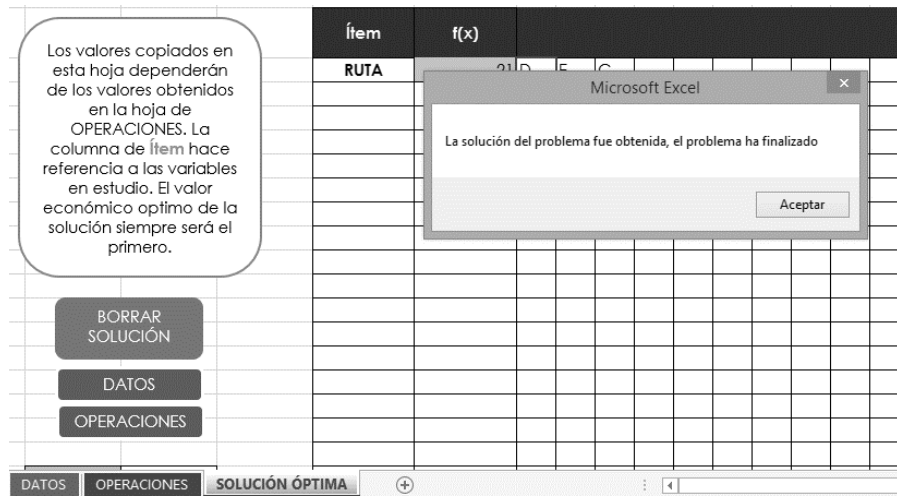
Luego de haber operado todas las etapas el usuario podrá obtener la solución en la hoja solución óptima, obteniendo el valor de la función objetivo y las alternativas óptimas, tal y como se muestra en las figuras 6 y 7.

Figura 6. Indicador de inicio de solución



Fuente. elaboración propia.

Figura 7. Indicador de finalización del problema



Fuente: elaboración propia.

A continuación se mostrará la forma de trabajo de la herramienta, según los tres diferentes tipos de problema que han sido desarrollados:



Problema de asignación de recursos

Para este tipo de problemas los valores económicos que deben ser alimentados en la hoja de datos podrán ser insertados por el usuario en cualquier celda de dicha hoja (figura 8). Otros datos adicionales de entrada son: el número de etapas, de estados y de alternativas en el problema (figura 9). Para iniciar la ejecución de las operaciones de cálculo del problema el usuario debe oprimir el botón de “asignación de recursos”.

Figura 8. Valores económicos de entrada – asignación de recursos

INSERTAR

BORRAR

OPERACIONES

SOLUCIÓN ÓPTIMA

inv. (millones)	PA	PB	PC
1	9	4	6
2	11	8	9
3	14	11	13

Restricciones - DISTANCIA

	A	B	C
A	0	7	8
B	7	0	0
C	8	0	0
D	5	0	0
E	0	12	8
F	0	0	9
G	0	0	0

...
DATOS
OPERACIONES
SOLUCIÓN ÓPTIMA
+

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Datos de entrada – asignación de recursos

Entrar etapa

¿Cuántas etapas hay en el problema ?:

Entrar estados

¿Cuántos estados hay ?:

Entrar alternativas

¿Cuántas alternativas hay ?:

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, el usuario deberá seleccionar el dato o valor económico correspondiente para cada una de las alternativas según la etapa que se esté ejecutando, en este caso es la alternativa 1 de la etapa 1 (figura 10). Finalmente, para obtener la solución el usuario deberá insertar los nombres de las variables de decisión que requieran de solución, estos nombres se insertaran en la columna de “Ítem” en la hoja de solución óptima (figura 12), luego de esto el usuario obtendrá



las soluciones óptimas en la hoja de solución óptima (figura 13) y así mismo verificar los cálculos realizados en cada una de las etapas en la hoja de operaciones (figura 11).

Figura 10. Selección de valores económicos para cada alternativa – asignación de recursos

inv. (millones)	PA	PB	PC
1	9	4	6
2	11	8	9
3	14	11	13

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Cálculos obtenidos de la ejecución de las etapas, hoja de operaciones – asignación de recursos

	1	2	3
1	6		
2	6	9	
3	6	9	13
4	6	9	13
5	6	9	13
6	6	9	13

	1	2	3
1			
2	10		
3	13	14	
4	17	17	17
5	17	21	20
6	17	21	24

	1	2	3
1			
2			
3	19		
4	23	21	
5	26	25	24
6	30	28	28

f(x)	m*
6	1
9	2
13	3
13	3
13	3
13	3
13	3
0	0
10	1
14	2
17	1 2 3
21	2
24	3
0	0
0	0
19	1
23	1
26	1
30	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Definición de variables de decisión para obtención de la solución – asignación de recursos

Los valores copiados en esta hoja dependerán de los valores obtenidos en la hoja de OPERACIONES. La columna de Ítem hace referencia a las variables en estudio. El valor económico óptimo de la solución siempre será el primero.

BORRAR SOLUCIÓN

DATOS

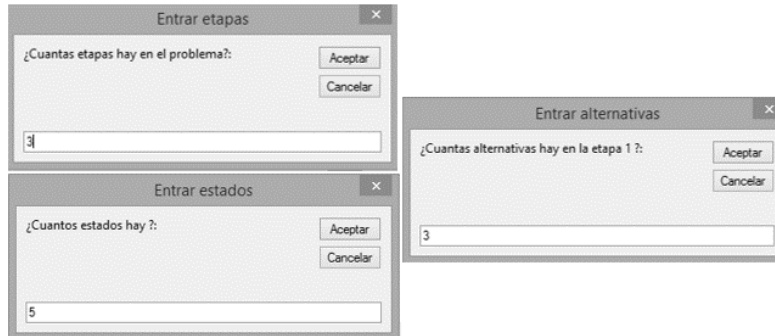
OPERACIONES

Valor económica de la solución

Fuente: elaboración propia.



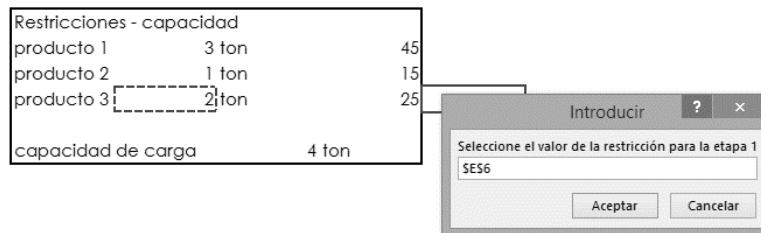
Figura 15. Datos de entrada – problema de carga



Fuente: elaboración propia.

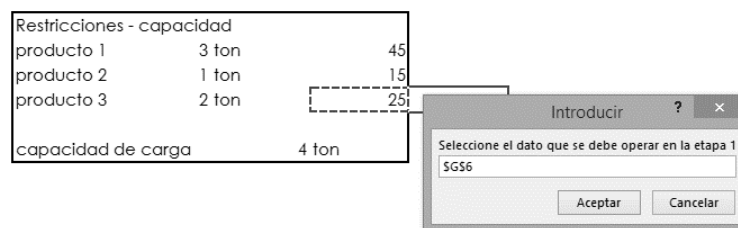
En cada una de las etapas el usuario debe seleccionar la restricción y el valor económico asociado a esta (figura 16 y 17), todos los cálculos correspondientes serán ejecutados. Para la solución del problema el usuario deberá digitar el nombre de las variables en estudio el cual se insertará en la hoja de solución óptima (figura 18) en la columna de “Ítem”, en este instante el problema habrá finalizado. El usuario podrá visualizar las soluciones en la hoja de solución óptima (figura 20) y el desarrollo de cada una de las etapas en la hoja de operaciones (figura 19), la alternativa optima o m* es “C” cuando su valor numérico es cero.

Figura 16. Selección de la restricción en cada etapa – problema de carga



Fuente: elaboración propia.

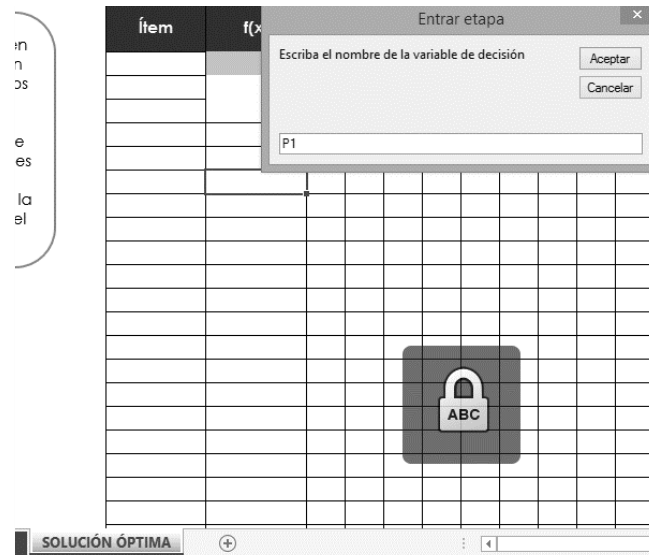
Figura 17. Selección del valor económico en cada etapa – problema de carga



Fuente: elaboración propia.

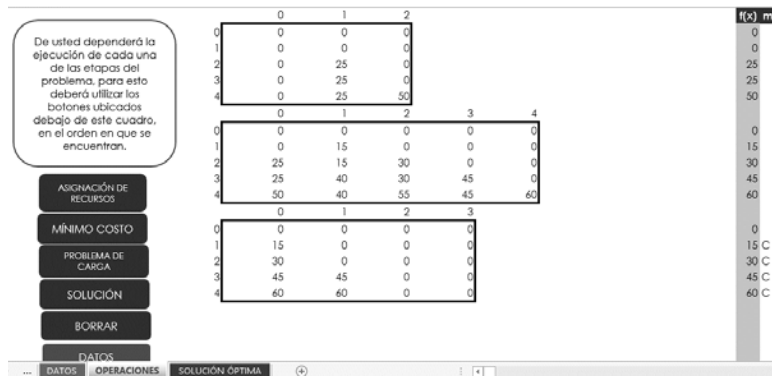


Figura 18. Definición de variables de decisión, para la solución – problema de carga



Fuente: elaboración propia.

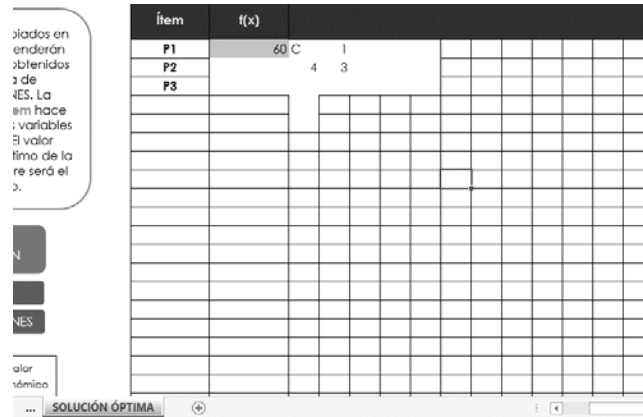
Figura 19. Desarrollo de todas las etapas, hoja de operaciones – problema de carga



Fuente: elaboración propia.



Figura 20. Solución(es) obtenida(s), hoja de solución óptima – problema de carga

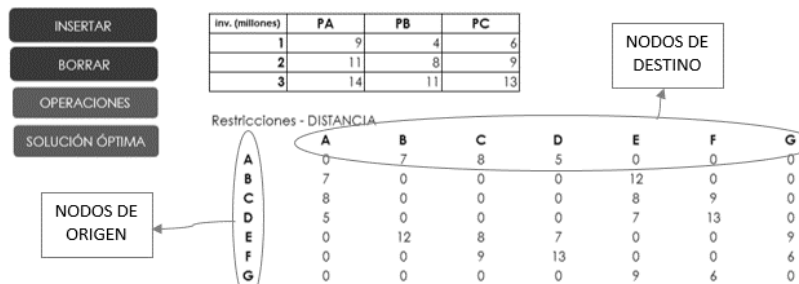


Fuente: elaboración propia.

Problemas de costo mínimo

Para desarrollar este tipo de problema se tuvo en cuenta que los estados y las alternativas son variables en cada una de las etapas. El desarrollo de las operaciones se realizó con base a los datos de entrada que debe insertar en la hoja de datos en forma de matriz, tal y como se muestra en la siguiente figura (21), los nodos de origen se deben posicionar de manera vertical y los nodos de destino de manera horizontal, y en las intersecciones de estos los valores ya sea de costo o de distancia entre los nodos.

Figura 21. Datos de entrada – costo mínimo

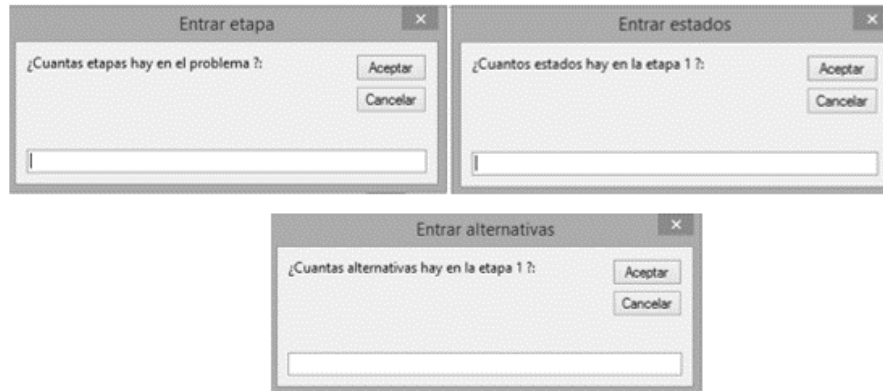


Fuente: elaboración propia.

Luego de insertar los datos de entrada en la hoja de datos el usuario debe dirigirse a la hoja de operaciones y oprimir el botón de “mínimo costo”, allí iniciará la ejecución de los cálculos a lo largo de las etapas. Como datos de entrada en esta parte del proceso el usuario deberá suministrar el número de etapas del problema, y el número de estados y alternativas en cada una de las etapas.



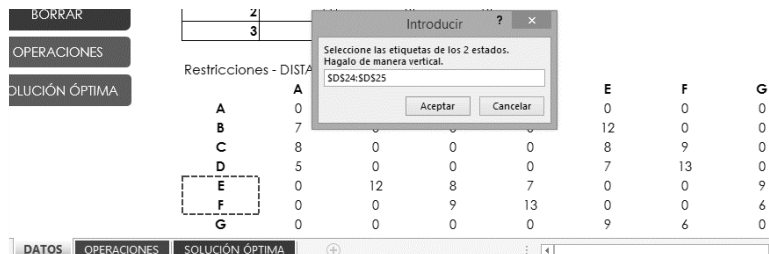
Figura 22. Datos de entrada adicionales – costo mínimo



Fuente: elaboración propia.

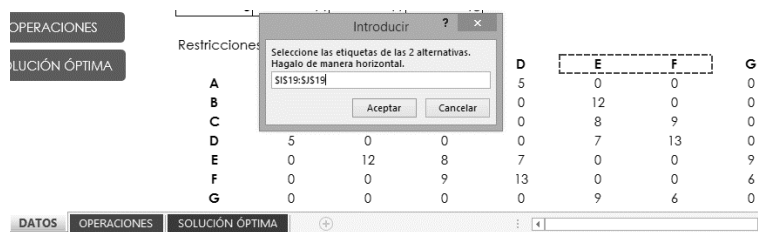
Inicialmente el usuario debe definir los rótulos o etiquetas para cada una de las etapas, seleccionando el rango que la herramienta le esté indicando, los estados deberán seleccionarse de manera vertical y las alternativas de manera horizontal (figura 23 y 24), luego el usuario debe elegir el valor numérico relacionado de costos o distancia entre el nodo de origen y el de destino según le sea indicado (figura 25). Cada vez que un costo o distancia de relación entre nodos sea de cero, en la hoja de operaciones se verá reflejado como “NA” (figura 26).

Figura 23. Definición de etiquetas de los estados – costo mínimo



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Definición de etiquetas de las alternativas – costo mínimo



Fuente: elaboración propia.



Figura 25. Definición de valores entre nodos de origen y destino – costo mínimo

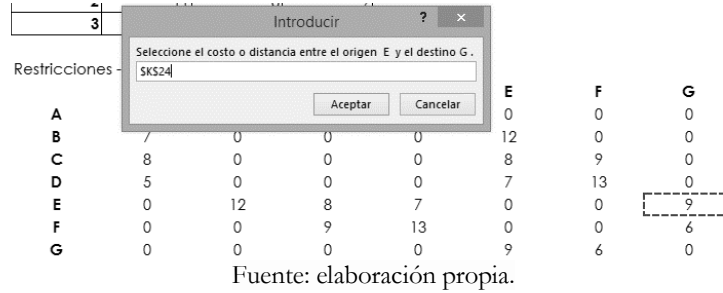
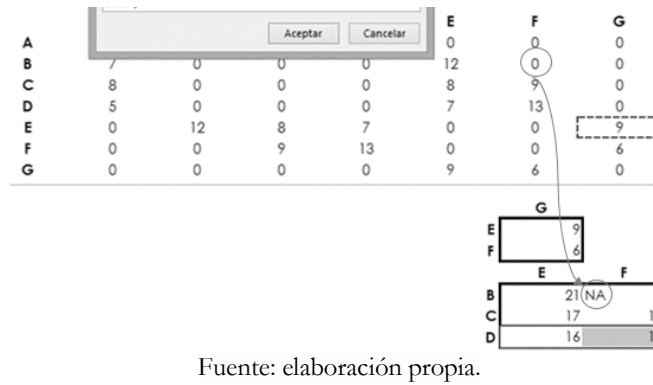
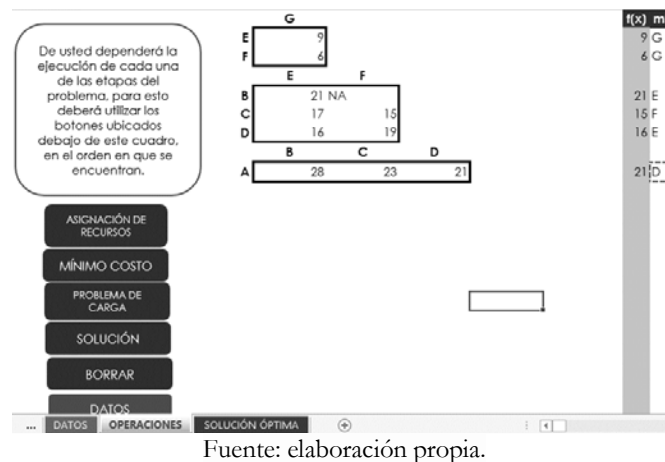


Figura 26. Relación de costos o distancia “cero” entre nodos – costo mínimo



Una vez finalizados los cálculos en cada una de las etapas, el usuario obtendrá las soluciones en la hoja solución óptima, este también podrá verificar cada uno de los cálculos en la hoja de operaciones (figura 27 y 28).

Figura 27. Cálculos de todas las etapas, hoja de operaciones – costo mínimo





cada alternativa, esto a causa de que el usuario no debe plantear ecuaciones en esta fase. Por último, la solución es realizada por la herramienta, lo que también disminuye el tiempo de desarrollo del problema. La única restricción presentada es que el problema no puede tener más de 30 alternativas, debido a que la herramienta ha sido diseñada y programada para problemas de esta dimensión o tamaño.

Referencias

- Acosta, P. (Mayo de 2010). *MS Excel 2007 con Programación de Macros VBA*. Recuperado de <http://www3.uji.es/~berbel/Visual%20Basic/Manuales/Excelvbaplication%202010.pdf>
- Maurette, M., & Ojea, I. (2006). *Programación dinámica*. Buenos Aires. Recuperado de http://cms.dm.uba.ar/materias/1ercuat2009/optimizacion/Maurette_Ojea.pdf
- Obregón Quintana, B. (2005). *Teoría de redes: el problema de la ruta más corta*. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ramos, A. (s.f.). Programación dinámica (DP). Recuperado de https://www.iit.comillas.edu/aramos/simio/transpa/t_dp_ar.pdf
- Rodríguez Fuentes, L. J., & Varona Fernández, A. (2015). Técnicas de diseño de algoritmos Programación dinámica. Examen (Autoevaluación): con soluciones. Recuperado de https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/9438/mod_resource/content/1/05_Programacion_Dinamica/05_PD_Examen.pdf
- Rodríguez Rojas, W. J. (2005). Conceptos y ejemplos básicos de programación dinámica. [Tesis Fundación Universitaria Konrad Lorenz].
- Taha HA. (2012). Investigación de operaciones. 9ª ed. Naucalpan de Juárez: Pearson México;



Diseño de un modelo de secuenciación enfocado en árboles de producto multinivel para sistemas de producción *Just in Time - JIT*

Wendi Amaris Jerez³

Resumen

El problema de secuenciación de los sistemas de producción multinivel para sistema de producción Just in Time JIT o en modelos mixtos reside en un análisis limitado de un árbol de producto con múltiples niveles, por parte de las Heurísticas que lo componen, tales como Monden y Miltenburg, las cuales llegan a una programación o secuenciación de fabricación, partiendo de dos niveles del BOM (Bill of materials) como lo es materias primas y producto terminado. Este artículo se desarrolla a partir de estas Heurísticas, proponiendo una mejora en estas con el fin de lograr un análisis completo en cuanto a los niveles que lo componen, así mismo de los elementos involucrados en el proceso de distribución y reducción en cuanto a los desperdicios generados durante cada etapa por la que se somete un producto.

Palabras clave: heurística, sistemas de producción, secuencia de fabricación, árbol de producto multinivel.

Introducción

Los sistemas de producción *Just in Time* (JIT), son aquellos diseñados para lograr mejoras continuas que garanticen una minimización de residuos generados durante los procesos de fabricación, buscando con ello el control físico del material a utilizar. Por otro lado, se tiene dentro de las temáticas a tratar en esta investigación, la Heurística Monden, la cual tiene como objetivo la secuenciación de unidades de productos terminados, teniendo en cuenta cada uno de sus componentes al momento de realizarlos, logrando así la disminución en la discrepancia generada por los recursos de cada producto, dando el mismo peso de importancia a todos los niveles que conforman su lista de materiales. Se cuenta también con lo formulado por la Heurística Miltenburg, en donde se observa que esta metodología genera la secuenciación para líneas de ensamble multinivel, mostrando que, a diferencia del Monden, esta no solo tiene en cuenta dentro de su análisis la materia prima y el producto terminado, sino que también analiza otros niveles del árbol de producto como subensambles y componentes, pero lo hace de forma limitada, ya que solo llega a una observación de árboles de producto de cuatro niveles, en los que su peso de importancia están entre 0 y 1.

Es por ello que el presente trabajo de investigación pretende llegar al diseño de un modelo de secuenciación más completo, en el que se busca un análisis de los m niveles que conforma un árbol de producto multinivel, con sus n unidades de productos a fabricar y que llegue a una

³ Grupo PIT - Producción, Innovación y Tecnología. Universidad Militar Nueva Granada. Correo electrónico: u2902631@unimilitar.edu.co

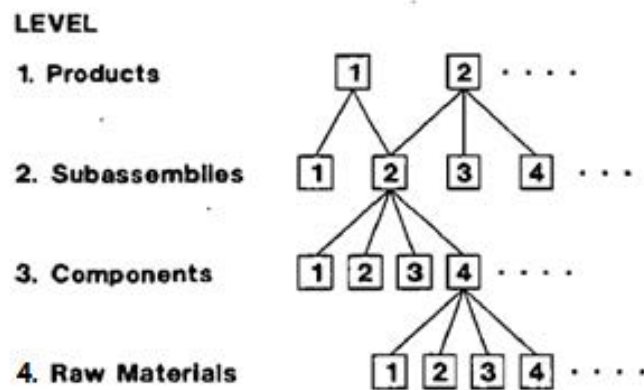


reducción casi completa de los residuos generados dentro de cada proceso de producción. Por otro lado, se busca incluir una extensión en las condiciones multinivel con variables de tipo *inbound* y *outbounds*, con este último se quiere mostrar y tener en cuenta aquellos elementos que afectan la secuenciación y que se encuentran más allá del proceso de producción.

Descripción del problema

Actualmente las empresas de producción ATO (Assembly to Order) y MTO (Make to Orden), se encuentran evaluando sus sistemas de secuenciación mediante el sistema *Just in Time*, conocido también como la Heurística de Nivelación Monden, buscando la reducción de inventarios, así mismo en cuanto a desperdicios y costos generados en sus procesos de producción. A pesar de las ventajas que ofrece, solo tienen en cuenta dentro de su análisis, el producto terminado y componentes de materia prima para la secuenciación de tareas, sin incluir los otros niveles pertenecientes del BOM (*Bill of Materials*) o árbol de producto, y que al no ser evaluados o analizados se corre el riesgo de no estar controlando por completo la desviación de materiales, lo que implica que no se elimina por completo la carga medioambiental que se va generando en cada etapa, por lo que se va sometiendo el material hasta llegar a ser un producto terminado. Es por ello que un análisis incompleto de un árbol de producto lleva a cuestionar la eficiencia y calidad tanto de los modelos aplicados como de los productos obtenidos, así mismo qué tanto podría afectar al producto terminado aquellos factores que no se encuentran dentro de su proceso de producción, pero que se ven reflejados en el proceso de distribución por el que un producto debe pasar para llegar al cliente final.

Figura 1. Mixed-Model Multi-Level Production System



Fuente: elaboración propia

Al analizar la Heurística Monden con desviaciones unitarizadas, vemos que busca llegar a la programación o secuenciación de fabricación, reduciendo al máximo la utilización de recursos o consumo de insumos de materia prima a utilizar, con el fin de garantizar la mejor selección del producto a programar, es decir solo se analiza el último nivel del árbol de producto, pero se secuencia el orden del producto final a fabricar. Esta se desarrolla de la siguiente forma:



Se tiene la siguiente expresión:

$$D_{k,i} \text{ Min} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{k * N_j}{\sum_{i=1}^p Q_i} - X_{j,k-1} - b_{ij} \right)^2}$$

Con los siguientes parámetros:

n = Número de diferentes recursos requeridos

p = Número total de tipos de productos analizados

N_j = Cantidad total del componente j requerido en la secuencia completa

Q_i = Número de unidades del producto i a incluir en la secuencia

K = Número de secuencia del programa

del actual producto final

$X_{j,K-1}$ = Cantidad acumulada de componentes j usada a través de la secuencia

$K - 1$

b_{ij} = Cantidad de componentes j

requerido para hacer una unidad del producto final i

Manejando los cinco pasos a seguir para su implementación:

1. Calcular el Tiempo de Ciclo (TC).
2. Calcular Q (Max TC/ TC_i).
3. Calcular N_j .
4. Calcular $D_{k,i} \text{ Min}$ para cada K .
5. Definir la programación o secuencia de fabricación correspondiente.

Ejemplo 1

Se tiene un mix de 3 productos (A, B, C), con una demanda de 3800, 1900 y 2000 respectivamente y un consumo de insumos dado por dos recursos como se muestra a continuación.

Tabla 1. Datos de producción. Ejemplo 1

Mix de Productos	Demanda (M.P.S)	Consumo de Insumos	
		R1	R2
A	3800	3	2
B	1900	1	4
C	2000	2	6

Fuente: elaboración propia.



Con una capacidad de 50 horas/máquina. Una vez realizado los tres primeros pasos, se tiene lo siguiente:

Tabla 2. Solución ejemplo 1

Mix de Productos	TC	Q	N1	N2
A	0,0131	2	6	4
B	0.0260	1	1	4
C	0.0250	2	4	12
		5	11	20

Fuente: elaboración propia.

Al momento de hallar los respectivos $D_{k,i} Min$ para cada uno, se va programando el producto con el menor valor por iteración, es por ello que al hacerlo con dicho ejemplo se tiene como programación o secuenciación de fabricación la siguiente:

Tabla 3. S.F. Ejemplo 1

Secuencia de Fabricación

1	B
1	A
1	C
1	A
1	C

Fuente: elaboración propia.

Este modelo realiza la secuenciación de los productos a fabricar a partir del control de los recursos, es por ello que esta sigue la iteración dependiendo del tiempo disponible para cada uno.

Modelo matemático Heurística Miltenburg

El modelo Miltenburg (1989) estudió el problema de análisis de un solo nivel, es por ello que esta heurística presenta un modelo con una extensión de este, llegando a un análisis de cuatro niveles del árbol de producto y mostrando la diferencia entre sistemas de uno y varios niveles, el cual lleva a adquirir mayor información de aquellas piezas con las que se forma un producto, incorporando así este análisis dentro de su modelo matemático para sistemas multinivel, tal y como se muestra en las siguientes variables.

j = número de niveles del árbol donde 1 representa al producto terminado

n_j = número de salidas en el nivel j

d_{i1} = Demanda del producto i , $i = 1, 2, \dots, n_1$

t_{hji} = Número de unidades de la salida h en el nivel j para



fabricar una unidad de producto i

Al hablar de los niveles Miltenburg plantea lo siguiente

$$d_{hj} = \sum_{i=1}^{n_1} t_{hji} * d_{i1} \text{ Demanda de la salida } h \text{ en el nivel } j$$

$$DT_j = \sum_{h=1}^{n_j} d_{hj} \text{ Demanda total de producción en el nivel } j$$

$$r_{hj} = \frac{d_{hj}}{DT_j} \text{ Relación de la producción en el nivel } j \text{ respecto a la salida } h$$

$$x_{hjk} = \sum_{i=1}^{n_1} t_{hji} * x_{i1k} \text{ Número de unidades de la salida } h \text{ en el nivel } j \text{ generada en la etapa } k$$

$$XT_{jk} = \sum_{h=1}^{n_j} x_{hjk} \text{ Total de producción en el nivel } j \text{ durante la etapa } k$$

$w_j =$ pesos de importancia del nivel j para la secuenciación

Con reglas de decisión a la hora de programar o secuenciar el orden de fabricación.

$$H_{ik} \min = w_1 * (x_{i1(k-1)} - k * r_{i1}) + 0,5 * \sum_{j=2}^4 \beta_{ijk}$$

$$\beta_{ijk} = \sum_{h=1}^{n_j} w_j * [(x_{hj(k-1)} + t_{hji}) - (XT_{j(k-1)} + \alpha_{ji}) * r_{hj}]^2$$

$$\alpha_{ji} = \sum_{h=1}^{n_j} t_{hji}$$



Ejemplo 2

Para mostrar cómo funciona la Heurística Miltenburg, se hará un breve ejercicio de aplicación en el que se cuenta con $n_1=3$ productos terminados, los cuales cuentan con $n_2=3$ subensambles compuestos por $n_3=4$ componentes que requieren de $n_4=3$ materias primas, como se muestra a continuación:

	<i>Producto</i>		
<i>Subensamblable</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>1</i>	0	1	0
<i>2</i>	1	1	1
<i>3</i>	0	4	0

	<i>Subensamblable</i>		
<i>Componente</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>1</i>	0	0	4
<i>2</i>	0	1	0
<i>3</i>	1	1	0
<i>4</i>	1	0	1

	<i>Componentes</i>			
<i>Materias primas</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>1</i>	1	0	1	0
<i>2</i>	0	0	0	1
<i>3</i>	1	1	0	1

Para empezar con la solución, cada uno de los niveles deben estar en función al producto terminado, de la siguiente forma:

<i>Subensambles</i>	<i>Componentes</i>				<i>Materias primas</i>		
	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>MI</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>
<i>S1</i>	0	0	1	1	1	0	1
<i>S2</i>	0	1	1	0	0	0	1
<i>S3</i>	4	0	0	1	1	0	0
					<i>C4</i>	0	1

Con los datos anteriores se hallan las primeras variables planteadas por el modelo, tal y como se muestra a continuación:

<i>ri1</i>	<i>di1</i>	<i>j=1</i>	<i>j=2</i>			<i>ai</i>
			<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	
0.2857	2	<i>P1</i>	0	1	0	1
0.2857	2	<i>P2</i>	1	1	4	6
0.4286	3	<i>P3</i>	0	1	0	1
	7	Demanda dhj	2	7	8	17
		rh2	0.1176	0.4118	0.4706	



		j=3				
		C1	C2	C3	C4	α_{2i}
		0	1	1	0	2
		16	1	2	5	24
		0	1	1	0	2
		32	7	9	10	58
rh3		0.5517	0.1207	0.1552	0.1724	

		j=4			
		M1	M2	M3	α_{3i}
		1	0	1	2
		18	5	22	45
		1	0	1	2
		41	10	49	100
rh4		0.4100	0.1000	0.4900	

Teniendo esto ya se puede entrar a evaluar las reglas de decisión mediante la solución de iteración.

k	1
---	---

	$w1*(x1(0) - 1*ri1)$	β_{i21}	TOTAL
i=1	- 0.2857	0.0138 0.3460	0.2215 0.5813
i=2	- 0.2857	0.0865 2.1626	1.3841 3.6332
i=3	- 0.4286	0.0138 0.3460	0.2215 0.5813

	β_{i31}	TOTAL	β_{i41}	TOTAL
1.2176	0.5755 0.4756	0.1189 2.3876	0.0324 0.0400	0.0004 0.0728
7.6100	3.5969 2.9727	0.7432 14.9227	0.2025 0.2500	0.0025 0.4550
1.2176	0.5755 0.4756	0.1189 2.3876	0.0324 0.0400	0.0004 0.0728

Hi1
1.2352
9.2198
1.0923 1 und de P3

Al evaluar esta regla de decisión y como lo dice el modelo, nos muestra que lo primero en secuenciar es una unidad del producto 3, y así sucesivamente para las siguientes 6 iteraciones, al finalizar esto tendremos el siguiente resultado:



k	j=1			j=2			j=3			j=4						
	x11k	x21k	x31k	x12k	x22k	x32k	XT2K	x13k	x23k	x33k	x43k	XT3K	x14k	x24k	x34k	XT4K
k=0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k=1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	2	1	0	1	2
k=2	0	1	1	1	2	4	7	16	2	3	5	26	19	5	23	47
k=3	1	1	1	1	3	4	8	16	3	4	5	28	20	5	24	49
k=4	1	1	2	1	4	4	9	16	4	5	5	30	21	5	25	51
k=5	2	1	2	1	5	4	10	16	5	6	5	32	22	5	26	53
k=6	2	2	2	2	6	8	16	32	6	8	10	56	40	10	48	98
k=7	2	4	1	2	7	8	17	32	7	9	10	58	41	10	49	100

Esta tabla nos muestra el orden y número de unidades a secuenciar durante cada etapa, así mismo lleva un control de los recursos que se van utilizando en las etapas de cada nivel por cada producto a fabricar. Ya con esta información es posible establecer la secuencia de fabricación que se llevara a cabo para este ejemplo.

SECUENCIA	
k=1	3
k=2	2
k=3	1
k=4	3
k=5	1
k=6	2
k=7	3

Ampliación de la heurística y extensión de la condición multinivel con variables de tipo *inbound*

Al tener la Heurística de Miltenburg y ver cómo esta funciona, no solo se ve la limitación que se tiene en cuanto al análisis de niveles, recordando que esta solo toma cuatro, los cuales corresponden a n_1 = Producto terminado, n_2 = Subensambles, n_3 = Componentes y n_4 = Materia prima, es por ello que se plantea una ampliación de este, modificando el alcance inicial en reglas de decisión, quedando así de la siguiente forma:

$$H_{ik} \min = w_1 * (x_{i1(k-1)} - k * r_{i1}) + 0,5 * \sum_{j=2}^m \beta_{ijk}$$

En donde la desviación por nivel ya no va hasta 4 niveles, sino que abarca los m niveles que componen un árbol de producto multi-nivel.

Por otro lado, se planteó la extensión en la condición multinivel con variables de tipo *inbound*, es por ello que ahora dentro del modelo se tiene en cuenta variables involucradas en el proceso de fabricación y que no son tenidas en cuenta, dichas variables se muestran a continuación:



T_{hji} = *Tiempos transcurridos en salida i en nivel j
usados en la producción de una
unidad de producto h*

Esta variable incluye aquellos tiempos generados durante cada etapa de un nivel, siendo de producción y transporte neto. Ya que estos afectan cada proceso por el que pasa un producto. Debe ser evaluado de la siguiente forma:

$$\varphi_{ji} = \sum_{h=1}^{n_j} w_j * \sum_{h=1}^{n_j} T_{hji}$$

Mostrando así la relación entre el peso asignado a cada nivel y los tiempos generados durante cada etapa.

Por otro lado, se habla de prioridades asignadas a cada producto:

p_{i1} = *Peso de prioridad asignado al producto i , $i = 1, 2, \dots, n_1$*

Cuando se habla de prioridad, se hace referencia a la importancia que tiene para la empresa sus clientes o como está constituido su CRM, el cual es un modelo de gestión organizacional basado en la satisfacción del cliente y cómo este se puede alterar o se encuentra relacionado directamente con la programación o secuenciación de un producto. Es por ello que algunas de las prioridades a tener en cuenta son las siguientes:

Por tiempo de entrega: es decir si la secuenciación de un producto depende directamente del tiempo de entrega, si se le da prioridad a aquellos productos que fueron solicitados primero que otros o aquellos a los que se les debe entrega en un menor tiempo, es decir por tiempo de entrega.

Por antigüedad del cliente: hace referencia a aquellos pedidos solicitados por clientes que llevan mayor tiempo solicitando los servicios de la empresa productora, teniendo en cuenta a esos clientes top de la compañía o clientes potenciales o aquellos nuevos clientes.

Cantidad de pedido: muestra cómo para algunas compañías, es prioritario secuenciar primero aquellos productos con un mayor lote de pedido.

Es por ello que para evaluar esta variable se debe determinar qué tipo de prioridades se ha planteado la empresa y el peso de importancia que esta le da a cada una sobre el producto. La asignación de estos pesos se encuentra distribuida de la siguiente forma:



Tabla 4. Asignación de pesos

Peso	Prioridad
0.2	Nada Importante
0.4	Poco Importante
0.6	Medianamente Importante
0.8	Importante
1	Muy Importante

Fuente: elaboración propia.

Una vez asignado el peso en cada prioridad, se busca tomarlos todos y aplicar la siguiente función:

$$\omega_{jik} = w_1 * \sum_{h=1}^{n_j} p_{i1}$$

Con el fin de mostrar la relación entre el peso del nivel 1 con el peso total asignado a ese producto.

Como toda compañía, maneja políticas de calidad, en la que se asume penalizaciones por inconformidades de clientes, es por ello que para estas se tiene:

$$P_{i1} = \text{Peso de penalización asignado al producto } i, i = 1, 2, \dots, n_1$$

En donde se habla de penalizaciones de tipo económico que pueden ser dadas por:

- Demora o retrasos en entregas.
- Pedidos incompletos.
- Productos no conformes.

A pesar de que dichas penalizaciones usualmente son de tipo económico, aquí se evaluará igualmente por medio de asignación de pesos, en donde la empresa evaluará en qué no le conviene caer, teniendo en cuenta algunas de las penalizaciones ya nombradas, dichos pesos se encuentran distribuidos de la siguiente forma:

Tabla 5. Asignación de pesos

Peso	Penalización
0.2	Muy Baja
0.4	Baja
0.6	Media
0.8	Alta
1	Muy Alta

Fuente: elaboración propia.



Al asignar los respectivos pesos a cada penalización, se evaluará por medio de la siguiente función:

$$\varepsilon_{jik} = w_1 * \sum_{h=1}^{n_j} P_{i1}$$

Para analizar los tipos de penalizaciones en las que se puede incluir, debe tener en cuenta las prioridades de la empresa en cuanto a sus clientes o su CRM, y así mismo el tipo de producto que se maneje.

Una vez identificadas estas variables de tipo *inbound*, se modifica de nuevo el criterio o reglas de decisión, ya que se busca que no solo se analice para la secuenciación las etapas, niveles y producto terminado, sino que también se incluya dentro del análisis este tipo de extensión en la condición multinivel, quedado así:

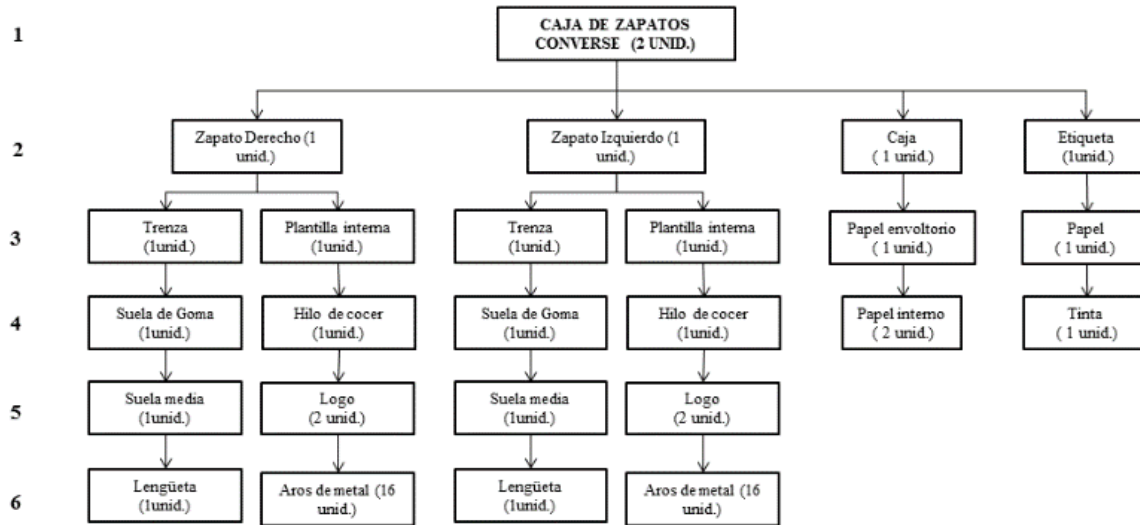
$$H_{ik} \min = w_1 * (x_{i1(k-1)} - k * r_{i1}) + 0,5 * \sum_{j=2}^m \beta_{ijk} + \omega_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

$$\beta_{ijk} = \sum_{h=1}^{n_j} w_j * [(x_{hj(k-1)} + t_{hji}) - (XT_{j(k-1)} + \alpha_{ji}) * r_{hj}]^2 + \varphi_{ij}$$

Con esto ya se han analizado aquellos factores que pueden afectar la secuenciación de un producto, pero otra de las variables que es importante mencionar y analizar, es la del porcentaje de uso real de cada recurso utilizado en cada etapa de cada nivel, es por ello que una vez realizado el árbol de producto o lista de materiales y el producto final, se evaluará cuánto de lo que se necesitaba para cada nivel fue utilizado de lo que se tenía, y con ello determinar cuánto fue utilizado en total por el producto.

Programación de la Heurística Ampliada

Una vez definidas cada una de las variables a incluir, se evalúan por medio del siguiente ejemplo, el cual tiene el siguiente árbol de producto:



Ejemplo 3

Para la producción de zapatos de marca converse, el cual cuenta con tres tipos de referencia, se tienen $n_1 = 3$ productos terminados correspondiente a la caja de zapatos, con demandas de 3.000 unidades, 2.000 unidades y 1.000 unidades, respectivamente. Los productos se componen de $n_2 = 4$ ensambles correspondientes a zapato izquierdo y derecho más caja y etiqueta, compuestos a su vez de $n_3 = 4$ subensambles, siendo estos trenza y plantilla interna tanto para zapato derecho como izquierdo y papel envoltorio y papel, así mismo cada subensamble consta de $n_4 = 4$ diferentes componentes correspondiente a suela de goma e hilo de cocer para los zapatos, papel interno y tinta, dichos componentes constan de $n_5 = 2$ subcomponentes correspondientes a la suela media y logo de cada zapato y por ultimo cada subcomponente se compone de $n_6 = 2$ materias primas diferentes. La lista de materiales se presenta a continuación:

Producto				Ensamble				
Ensamble	P1	P2	P3	Subensamble	E1	E2	E3	E4
E1	1	1	1	SE1	1	1	0	0
E2	1	1	1	SE2	1	1	0	0
E3	1	1	1	SE3	0	0	1	0
E4	1	1	1	SE4	0	0	0	1

Subensamble				
Componente	SE1	SE2	SE3	SE4
C1	1	0	0	0
C2	0	1	0	0
C3	0	0	2	0
C4	0	0	0	1



Subcomponente	Componente				Materia Prima	Subcomponente	
	C1	C2	C3	C4		SC1	SC2
SC1	1	0	0	0	M1	1	0
SC2	0	2	0	0	M2	0	16

Adicional a esto, se cuenta con información que permitirá evaluar la condición multinivel con las variables ya mencionadas en cuanto *inbound*.

Para este ejercicio, se asumen los siguientes tiempos (estos dependen del tipo de proceso, producto o empresa, ya que esta última es la encargada de definir estos criterios), tanto de producción como de transporte, ambos dados en minutos, siendo estos de cada nivel y al realizar el cálculo correspondiente se obtiene lo siguiente:

TIEMPOS	Niveles					
	1	2	3	4	5	6
Tiempo de Producción (min)	0.98	0.92	0.60	0.48	0.40	0.30
Tiempo de transporte Neto (seg)	1.00	0.55	0.48	0.57	0.83	0.60
$\sum_{h=1}^{n_j} T_{hji}$	1.98	1.47	1.08	1.05	1.23	0.90
φ_{ji}	11.90	8.80	6.50	6.30	7.40	5.40

En cuanto a las prioridades, se tuvo en cuenta el tipo de producto y se quiso asignar un peso deferente a cada uno, con el fin de mostrar que para las empresas no siempre todas las referencias tienen la misma importancia tal y como se muestra en este ejemplo.

PRIORIDAD	Peso		
	P1	P2	P3
Tiempo de Pedido			
Primero en pedir	0.8	1	0.2
Primero en entregar	1	0.6	0.8
Antigüedad del Cliente	0.4	0.8	0.4
Cantidad de pedido	0.6	0.2	0.6
$\sum_{h=1}^{n_j} p_{i1}$	2.8	2.6	2
ω_{jik}	2.8	2.6	2

Por último, se tienen las penalizaciones dadas por incumpliendo en contratos, esto también se evalúa de forma independiente para cada producto.



PENALIZACIÓN	Peso		
	P1	P2	P3
Demora en entrega	1	0.8	0.6
Pedidos incompletos	0.6	0.4	0.8
Productos no conformes	0.8	0.6	0.2
$\sum_{h=1}^{n_j} P_{i1}$	2.4	1.8	1.6
ϵ_{jik}	2.4	1.8	1.6

Al contar con la información necesaria, se aplicó el modelo de Miltenburg ampliado y con extensión en su condición multinivel inicial, teniendo como resultado el siguiente.

Ensamble	Subensamble			
	SE1	SE2	SE3	SE4
E1	1	1	0	0
E2	1	1	0	0
E3	0	0	1	0
E4	0	0	0	1

Subensamble	Componente			
	C1	C2	C3	C4
SE1	1	0	0	0
SE2	0	1	0	0
SE3	0	0	2	0
SE4	0	0	0	1

Componente	Subcomponente	
	SC1	SC2
C1	1	0
C2	0	2
C3	0	0
C4	0	0

Subcomponente	Materia Prima	
	M1	M2
SC1	1	0
SC2	0	16

ri1	di1	j=1	j=2				α_{1i}
			E1	E2	E3	E4	
0.4000	2	P1	1	1	1	1	4
0.4000	2	P2	1	1	1	1	4
0.2000	1	P3	1	1	1	1	4
	5	Demanda dhj	5	5	5	5	20
		rh2	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	

rh3	j=3				α_{2i}	j=4				α_{3i}
	SE1	SE2	SE3	SE4		C1	C2	C3	C4	
	2	2	1	1	6	2	2	2	1	7
	2	2	1	1	6	2	2	2	1	7
	2	2	1	1	6	2	2	2	1	7
	10	10	5	5	30	10	10	10	5	35
rh3	0.3333	0.3333	0.1667	0.1667		rh4	0.2857	0.2857	0.2857	0.1429



j=5			j=6		
SC1	SC2	$\alpha 3i$	M1	M2	$\alpha 3i$
2	4	6	2	64	66
2	4	6	2	64	66
2	4	6	2	64	66
10	20	30	10	320	330
rh5	0.3333	0.6667	rh6	0.0303	0.9697

Al obtener los datos anteriores y evaluar el modelo con más de 4 niveles y en este caso 6, se tiene el criterio de selección para el primer producto a secuenciar, el cual muestra que por valores mínimos se inicia con la producción de zapatos de referencia 3.

Hi1

22.00

21.20

20.60 **1 und de P3**

Así mismo, se va evaluando cada iteración hasta llegar a la tabla que nos permite ver el uso de recursos por etapa y como se cumple con la demanda exigida:

k	j=1			j=2				j=3				j=4				j=5			j=6					
	x11k	x21k	x31k	x12k	x22k	x32k	x42k	XT2K	x13k	x23k	x33k	x43k	XT3K	x14k	x24k	x34k	x44k	XT4K	x14k	x24k	XT4K	x14k	x24k	XT4K
k=0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k=1	0	0	1	1	1	1	1	4	2	2	1	1	6	2	2	2	1	7	2	4	6	2	64	66
k=2	0	1	1	2	2	2	2	8	4	4	2	2	12	4	4	4	2	14	4	8	12	4	128	132
k=3	1	1	1	3	3	3	3	12	6	6	3	3	18	6	6	6	3	21	6	12	18	6	192	198
k=4	1	2	1	4	4	4	4	16	8	8	4	4	24	8	8	8	4	28	8	16	24	8	256	264
k=5	2	2	1	5	5	5	5	20	10	10	5	5	30	10	10	10	5	35	10	20	30	10	320	330

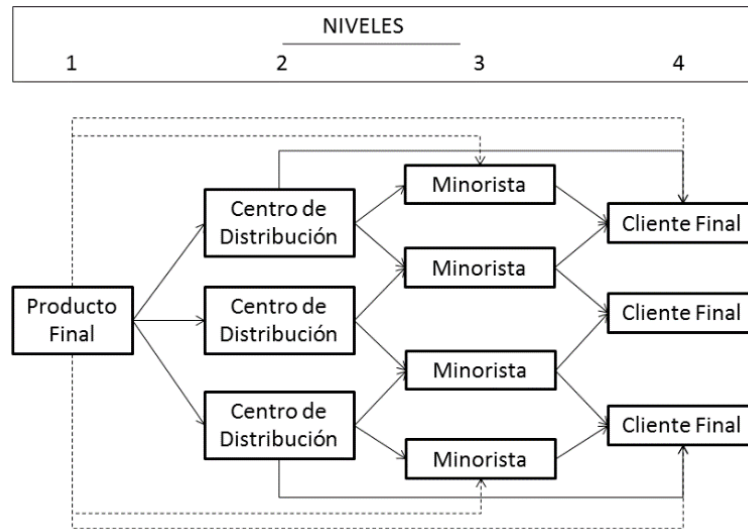
Y por último, se tiene la programación o secuenciación de los zapatos Converse, teniendo en cuenta que este cuenta con tres referencias que los diferencia unos de otros.

SECUENCIA	
k=1	3
k=2	2
k=3	1
k=4	2
k=5	1

Extensión de la condición multinivel con variables de tipo outbounds

Al hablar de *outbound*, se hace referencia a esa rama de la logística encargada de colocar el producto terminado en cada uno de los distintos puntos de venta y llegar a los distintos clientes, esta integra la función de stocks junto con el transporte, es por ello que a lo largo de la cadena de suministro se ha generado una mejora en la comunicación, como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 2. Cadena de suministro con cuatro niveles



Fuente: elaboración propia.

En este se muestra la conexión entre niveles pertenecientes a la cadena de suministros en donde por medio de la Planificación de Requerimientos de Distribución (DPR) se logra una administración y minimización de los inventarios de entrada, el cual es generalmente utilizado como un sistema de MRP llegando a ser más completo que este, ya que no solo son independientes, sino que pueden programar el transporte y lo más importante de este DPR es que llega a predecir con la mayor precisión posible la demanda, y así llegar a desarrollar los plazos de entrega. Este es importante para la realización de esta parte en la investigación, ya que se necesita conocer la demanda existente en cada nivel, útil para incluir dentro de la regla de decisión mencionada las siguientes variables.

q = número de niveles de la cadena

de suministro donde 1

representa al producto terminado

n_q = número de solicitudes por nivel q

$$DT_q = \sum_{i=1}^{n_1} n_q \text{ Demanda total de solicitud}$$

en el nivel q

Ya que como se puede observar en la figura 2, no siempre se lleva una secuencia de entrega. Existen casos en los que el cliente adquiere un producto directamente de la fábrica, es decir se observa la existencia de una interacción entre niveles, es por ello que a la hora de secuenciar un



producto es necesario conocer la demanda a satisfacer y el nivel dentro de la cadena de suministro en el que dicha demanda se encuentra, y así mismo aplicar las reglas de decisión.

Solicitudes (nq)	Niveles (q)			
	1	2	3	4
P1	2810	1643	1128	959
P2	2149	1925	1190	967
P3	2623	1728	1324	998
DT_q	15738	10368	7944	5988

Al contar con esta información, la cual corresponde a un ejemplo de cómo se empezaría a aplicar esta extensión en la condición del modelo, se observa que ya no solo se evaluaría una demanda fija, sino que dependiendo de cómo funcione la cadena de suministro de la compañía, se toma la demanda para ese nivel y del producto que se está solicitando.

Resultados de la ampliación de la heurística con extensión en la condición multinivel tanto en condiciones de *inbound* y *outbound*

Como pudo observarse en los ejemplos realizados, la aplicación de esta heurística evaluando las nuevas condiciones de extensión, lleva a notar que el análisis ya no solo va dirigido a qué programación o secuenciación de fabricación se somete a un mix de productos, sino que también se analiza cómo afecta a esta secuenciación y al cumplimiento de una empresa, factores como el tiempo en el que un producto tarda en realizar una operación durante cada etapa, por otro lado, se tiene en cuenta cómo las prioridades dadas a un cliente por parte del CRM diseñado por la empresa, y cómo este puede alterar una secuenciación ya asignada y por último al evaluar las penalizaciones a las que una compañía podría someterse al no cumplir a un cliente e incluirlas dentro del análisis de secuenciación, lleva a que al momento de asignar un orden de fabricación, se tenga en cuenta cada uno de estas, así mismo los aspectos ya mencionados, buscando que se logre una programación o secuenciación de fabricación completa en su análisis, es decir, se garantiza el cumplimiento de la demanda evitando sanciones por incumplimientos y logrando una satisfacción al cliente.

Conclusiones

Al realizar una revisión del estado del arte de las heurísticas de los sistemas de secuenciación *Just in Time* tales como Monde y Miltenburg, se identificaron variables inmersas en estas, las cuales permitieron llevar estos modelos de análisis de dos niveles a uno multinivel, extendiendo así sus condiciones, permitiendo tener en cuenta todas las etapas y niveles que hacen parte de un árbol de producto multinivel y así mismo llegar a un análisis completo, no solo en cuanto a producción, sino también teniendo en cuenta la cadena de suministro empleada en una empresa.

Por medio de un análisis en las variables, se permitió no solo llegar a la estructuración del modelo, sino que se pudo identificar otros factores inmersos en un proceso, tanto de producción como de distribución y que sin saberlo llegan a afectar la secuenciación de un mix de productos,



generando así futuras pérdidas para la empresa, o que estas incurran en errores que pueden generarles sobrecostos.

Referencias

- Allen, J. et al. (2001). *Lean Manufacturing: A plant floor guide*, Society of Manufacturing Engineers. U.S.A
- Bautista, J. (1993). *Procedimientos heurísticos y exactos para la secuenciación en sistemas productos de unidades homogéneas*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Bohórquez, H. T. (2015). *Gestión estratégica empresarial para mejorar las condiciones organizacionales y administrativas basadas en los principios de la metodología Lean*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Calero, J. L. (2000). Investigación cualitativa y cuantitativa. Problemas no resueltos en los debates actuales. *Rev. Cubana Endocrinol*, 11(3), 192-8.
- Ceballos, F. A. (2016). *Aplicativo prototipo para programar producción en Industrias Plásticas GR., a partir del análisis y diseño de sistemas*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Cheng, T., & Podolsky, S. (1996). Just-In-Time Manufacturing: An Introduction. In T. Cheng, & S. Podolsky (Editores). *Just-In-Time Manufacturing: An Introduction* (p. 257). Great Britain: Chapman & Hall.
- Sumichrast, T.S., & Rusell R.S. (1990). Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for just in time production systems <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0272696390901616>
- Garwood, D., (1998). *The bill of material is the Achilles heal of making our factories more competitive*, 45.
- Graham, C. J. (2000). *Application of Scheduling Theory to Spacecraft Constellations*. United States: Dissertation.com.
- Håkansson, J., Skoog, E., & Eriksson, K. (s.f.). *A review of assembly line balancing and sequencing including line layouts*. Sweden: University West, Department of Engineering Science.
- Hodson, W. K. (1998). Maynard. En W. K. Hodson (Editores). *Manual del Ingeniero Industrial*. México: McGrawHill.
- Hoekstra, A. Y. (2007). Human appropriation of natural capital: comparing ecological footprint and water footprint analysis. *Value of Water Report Series*, (23). Retrieved from <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report23-Hoekstra-2007.pdf>.
- Hutchins, D. (1988). Just in Time. En D. Hutchins (Editores). *Just in Time*, (p. 231). Great Britain: Gower Technical Press.
- Jianxin, J., Tseng, M. M., Qin Hai, M., & Yi, Z. (2000). *Generic Bill-of-Materials-and-Operations for High Variety Production Management*. Hong Kong: Concurrent Engineering: Research and Application.



- Kuhpfahl, J. (2016). Job Shop Scheduling with Consideration of Due Dates. En J. Kuhpfahl (Editores). *Job Shop Scheduling with Consideration of Due Dates*, (p. 190). Halle, Germany: Universität Halle-Wittenberg.
- Mohebalizadehgashti, F. (2016). *Balancing, Sequencing and Determining the Number and Length of Workstations in a Mixed Model Assembly Line*. Ontario, Canada: The University of Guelph.
- Rodríguez, A., Poler, R., García, J., & Lario, F. (1999). *ASGA: Algoritmo Genético para la secuenciación de montaje*. III Jornadas de Ingeniería de Organización, 8.
- Roqueme, E. A. (2015). *Implementación de la metodología lean para el mejoramiento del área comercial de la Pyme Tres60 Logística*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Soler, F. R., y Mateus, A. O. (2012). *Sistema de planeación y Control de la Producción de la Empresa Iberoamericana de Plásticos de Calidad LTDA*. Bogotá D. C.: Universidad Libre.



Diseño de un aplicativo para sistemas de secuenciación en ambientes de producción flexible y *Just in Time* -JIT

Ana Milena Castellanos⁴

Resumen

Una de los campos principales de la planeación y control de la producción es la secuenciación de tareas en todos los diferentes sistemas productivos existentes. Los más utilizados son los que hacen parte de la producción o manufactura flexible, tales como *Flow Shop* y *Job Shop*, así mismo, uno de los sistemas productivos más usados en este momento es JIT, donde cada uno maneja diferentes heurísticas para llevar a cabo la secuenciación de tareas, y donde toma en cuenta uno o diferentes niveles del árbol de producto o lista de materiales (BOM) unos toman solo el producto terminado, otros el producto terminado más la materia prima, pero ninguno toma los m niveles que un árbol de producto pueda llegar a tener, es evidente la carencia de herramientas o aplicativos que hay donde se pueda hacer un análisis de los diferentes sistemas productivos y los que proporcionan una mejor productividad y una mayor minimización de costos.

Palabras clave: sistemas de secuenciación, sistemas de producción, heurística, sistemas de producción flexible, *Just in Time*, árbol de producto multinivel.

Introducción

Al hablar de sistemas de secuenciación en ambientes de producción flexibles, se habla de sistemas tales como *Flow Shop*, el cual se divide en una sola máquina, en donde los trabajos a realizar tienen que ser procesados en una sola máquina, por medio de reglas de secuenciación específicas o regla simple, para secuenciar dichas tareas. Por otro lado, se tienen los sistemas de dos máquinas, estos trabajos deben ser organizados por métodos como el de FIFO, el cual indica que el primero en entrar debe ser el primero en salir, siguiendo una misma ruta. También se habla de los sistemas *Job Shop* o tipo taller, el cual busca encontrar la secuenciación óptima para las m máquinas de los n trabajos, cumpliendo con especificaciones dada por el modelo y al hablar de *Just in time*, se hace referencia a una filosofía en el campo de la planeación y el control de la producción, pero que al ser enfocado en el ámbito de la secuenciación tiene como objetivo la realización de tareas lo más rápido posible, cumpliendo así con el tiempo de entrega establecido.

Es por esto que este trabajo busca el desarrollo de un aplicativo de secuenciación para la planeación y el control de la producción, que tenga en cuenta cada uno de los modelos mencionados anteriormente, con el fin de llegar a un análisis de los diferentes niveles de un árbol

⁴ Grupo PIT - Producción, Innovación y Tecnología. Universidad Militar Nueva Granada. Correo electrónico: u2902643@unimilitar.edu.co



de producto de forma independiente, teniendo como objetivo la implementación de un modelo de análisis multinivel con el que la herramienta pueda realizar una comparación de todas las posibles secuenciaciones dadas por cada sistema y así dar una recomendación con la mejor selección.

Descripción del problema

El “diseño y desarrollo de un plan de requerimiento de materiales en la empresa manufacturera de cofres funerarios, Ecuacofre” hace parte del título de una investigación realizada en la Universidad de las Américas en el 2016, permite ver cómo la escasa planificación de las empresas, en cuanto a su aprovisionamiento y abastecimiento, llevan a que el flujo de información de los materiales y productos terminados no garanticen que lleven un proceso eficiente, y algunas rupturas de stock en todos los niveles que conforman un producto terminado. Esta investigación deja ver la necesidad de contar con una herramienta que evite que lo mencionado anteriormente ocurra de nuevo en una organización.

En otra investigación de nombre, “Modelos de planificación de la producción multinivel con lotes” tiene como objetivo principal, determinar un plan de producción de distintos productos a lo largo de un horizonte de planeación, en donde se llegue a una minimización en costos tanto de producción como de almacenaje, esto iniciando con modelos sencillos, teniendo como restricciones el tamaño de lote, tanto del producto final como de sus componentes, esto muestra la necesidad de optimizar los recursos que hacen parte de un producto terminado y que garanticen una minimización completa de los costos o desperdicios.

Por otro lado vemos por medio de una investigación llamada “Strategic Analysis of Integrated Production-Distribution with Systems: Models and Methods”, en la que se presenta un modelo integral que busca vincular decisiones y rendimiento a lo largo de la cadena de suministro incluyendo material-producción-distribución, con el propósito de apoyar el análisis de estrategias para el manejo de materiales y servicios, en este se incluye un prototipo de implementación de software. La implementación de herramientas que permitan llevar un control de esto, resultan siendo de gran beneficio para cualquier organización.

Alcance

Esta investigación tiene como alcance el diseño de un aplicativo funcional de secuenciación de tareas para sistemas de secuenciación en sistemas de producción flexible, tales como *Flow Shop*, *Job Shop*, y así mismo para sistemas *Just In Time*. Este tiene como fin llevar a cabo el análisis de múltiples niveles que conforman la lista de materiales o árbol de producto, en diferentes sistemas de producción, ya mencionados anteriormente para generar estrategias de secuenciación y consumo de materiales, donde el usuario pueda observar el desempeño de cada uno de los sistemas y pueda tomar este aplicativo para mejorar su sistema de toma de decisiones.



Para poder llevar a cabo el alcance descrito anteriormente en su totalidad, es necesario realizar un estado del arte de las heurísticas de cada uno de los sistemas de secuenciación ya mencionados anteriormente, para así determinar las variables que se deben tener en cuenta para el diseño del aplicativo, realizando su respectivo análisis de cada una de ellas. De igual forma, es de vital importancia hacer un análisis detallado de cada una de las variables vitales que conforman un árbol de producto que, junto con las variables de las heurísticas, pueda lograr la estructuración del aplicativo ya descrito anteriormente.

Modelos de las heurísticas de los sistemas de producción flexible y el sistema *Just In Time*

Flow Shop

Una máquina

El sistema de una máquina es donde todos los trabajos a hacer tienen que ser procesados en una sola máquina. Para este sistema hay muchas formas de secuenciar los trabajos, pero la más usada se conoce como las reglas de secuencia específica o reglas simples.

Para poder resolver un problema de secuenciación de una máquina, se debe asumir que el sistema cuenta con ciertas características: la máquina debe procesar un solo trabajo a la vez; la máquina tiene que estar disponible para el periodo de secuenciación; el tiempo de procesamiento en la máquina (P_j) de cada uno de los trabajos debe ser conocido y certero, ningún trabajo debe depender de los demás, este tiempo de procesamiento debe incluir tanto tiempo de preparación como tiempo de mecanizado; conocer parámetros fundamentales los cuales se mostrarán a continuación:

n = Número de trabajos que serán procesados

r_j = Tiempo de liberación del trabajo j

d_j = Fecha de entrega para el trabajo j

W_j = importancia del trabajo j respecto a los otros trabajos

C_j = Tiempo de terminación de trabajo j

Estos parámetros son fundamentales para poder llevar a cabo cualquiera de las reglas simples. Estas reglas simples son 6 reglas de secuencia específicas, las cuales son:

- FCFS: consiste en que los primeros trabajos en llegar, son los primeros en salir, es decir, la secuenciación se lleva a cabo por el orden de llegada de los trabajos.
- SPT: se secuencian primero el trabajo con menor tiempo de procesamiento (P_j), y se organizan todos los trabajos de menor a mayor según el tiempo de procesamiento



respectivo, es decir, el último trabajo a procesar debe ser el que tenga el mayor tiempo de procesamiento.

- EDD: esta regla consiste en secuenciar el trabajo que tenga la fecha de entrega más cercana (d_j), así sucesivamente, donde el último trabajo a procesar debe tener la fecha de entrega más lejana.
- WEIGHTS: esta regla consiste en secuenciar el trabajo que tenga la mayor prioridad (W_j), así sucesivamente, donde el último trabajo a procesar debe tener la menor prioridad.
- WSPT: es una unión entre el SPT y WEIGHTS, ya que consiste en sacar la relación entre la prioridad y el tiempo de procesamiento (W_j/P_j) y se secuencian primero el trabajo que tenga la mayor relación, se hace este proceso con todos los trabajos, donde el último a procesar será el que tenga la menor relación.

En cada una de estas reglas es necesario hallar unos indicadores que nos dirán, al momento de llevar a cabo las 6 reglas, cuál método le conviene más al usuario. Estos indicadores son:

- Tiempo de Flujo promedio (F).
- Tardanza Promedio (T) es igual a la máxima tardanza.
- Número de trabajos tardíos (U_t).
- *Makespan* o el tiempo de determinación de todos los trabajos (C_{max}).

Por lo general, el indicador a tener más en cuenta es el *Makespan* ya que es el tiempo total que transcurre desde el principio hasta el final del proceso. La regla específica de secuenciación con el menor C_{max} , se puede contemplar como el método de secuenciación óptimo a aplicar.

Dos o más máquinas

Flow Shop hace referencia al sistema que contiene m número de máquinas, donde cada uno de los trabajos deben ser procesados por todas las máquinas, esto quiere decir que tengo un conjunto n de trabajos, los cuales tienen m operaciones, y cada operación se lleva a cabo en una máquina diferente. Estos trabajos son organizados por el método FIFO (*First In, First Out*), el primero que entra es el primero que sale, los cuales deben seguir una misma ruta. Por ruta entendemos que el primer trabajo a procesar debe pasar por la máquina 1, después la dos hasta la máquina m , así mismo los n trabajos.

Este tipo de sistema de secuenciación maneja diferentes algoritmos tales como el algoritmo de Johnson tanto para 2 como para 3 máquinas, algoritmos heurísticos el cual trabaja para m máquinas, también está el algoritmo *Branch and Bound* que es para tres máquinas, entre otros.

Uno de los métodos más conocidos en este tipo de sistema de secuenciación es el algoritmo de Johnson, que consiste en n trabajos los cuales necesitan ser procesados por 2 máquinas, donde los tiempos de procesamiento tienen que conocerse con certeza, y el objetivo de este algoritmo es secuenciar los trabajos en las máquinas de tal forma que se minimice al máximo el *Makespan*.



Para este método tenemos P_{j1} y P_{j2} , que es el tiempo de procesamiento de los trabajos j en las máquinas 1 y 2. El primer paso para llevar a cabo este algoritmo es listar los valores de P_{j1} y P_{j2} en dos columnas, luego se ubica el elemento con valor mínimo entre las dos columnas, si este valor mínimo pertenece a la máquina 1, este trabajo se secuenciará primero, por el contrario, si el valor pertenece a la máquina 2, este se secuenciará de últimas. Así se hace con los n trabajos.

Este algoritmo se puede llevar a cabo para programar n trabajos en 3 máquinas, el cual consiste en definir dos subconjuntos ficticios (P'_{j1} , P'_{j2}), donde se definirán de la siguiente forma:

$$P'_{j1} = P_{j1} + P_{j2} \quad \text{y} \quad P'_{j2} = P_{j2} + P_{j3}$$

Los cuales deben cumplir las siguientes condiciones:

$$\min P_{j1} \geq \max P_{j2} \quad \text{o} \quad \min P_{j3} \geq \max P_{j2}$$

Ya definidos los subconjuntos ficticios, se lleva a cabo el procedimiento normal de Johnson, mencionado anteriormente, para hallar la secuenciación. Para hallar el *Makespan*, es necesario trabajar con los tiempos de procesamiento de las tres máquinas (P_{j1} , P_{j2} y P_{j3})

Job Shop

Job Shop hace referencia al sistema que contiene n número de trabajos y m número de tareas. Cada uno de los trabajos tiene una ruta diferente, es decir, cada uno de los trabajos maneja una ruta independiente, entendiéndose por ruta el orden de máquinas por las que tiene que ser procesado el trabajo.

El objetivo de *Job Shop* es encontrar una secuenciación óptima para las m máquinas de los n trabajos, para esto el sistema como tal debe cumplir con ciertas condiciones: 1) cada operación tiene que ser procesada exactamente una vez; 2) los trabajos que están siendo procesados no deben superponerse con algún otro trabajo; 3) en este sistema no puede haber prioridad mientras los trabajos están siendo procesados; 4) todas las máquinas tienen que estar disponibles siempre.

El algoritmo más conocido en el sistema de *Job Shop*, es el algoritmo Jackson donde se programan n trabajos para 2 máquinas. En este algoritmo se presentan tres situaciones para cada una de las máquinas, las cuales las podemos ver en la siguiente tabla:



Tabla 1. Posibilidades que puede presentar los n trabajos

Máquina A	Máquina B	N° Trabajos	Pj	Dj	Wj	Rj
		1	20	31	5	0
Trabajos AB	Trabajos BA	2	30	38	4	0
Algoritmo Johnson	Inverso Johnson	3	21	33	5	0
Trabajos A	Trabajos B	4	22	29	4	0
Regla SPT	Regla SPT	5	35	27	5	0
Trabajos BA	Trabajos AB	6	32	36	4	0
Inverso Johnson	Algoritmo Johnson	7	28	32	5	0
		8	29	31	5	0
		9	31	25	4	0
		10	26	22	5	0

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 1 podemos ver que para la máquina A, puede haber trabajos que tengan que ser procesados primero por A y después por B, también puede haber trabajos que solamente sean procesados por A, y por último puede haber trabajos que sea procesados primero por B y después por A. Para el primer caso, se agrupan todos los trabajos con esta condición y se secuencian con el algoritmo Johnson; para el segundo caso, se agrupan todos los trabajos y se secuencian con la regla específica de secuenciación SPT; y para el tercer caso se secuencian estos trabajos por el inverso Johnson.

De la misma forma se lleva a cabo con los trabajos que pasan por la máquina B, los que pasan primero por B y después por A, se secuencian con el inverso de Johnson, los que solo pasan por B se secuencian con la regla SPT, y los que pasan primero por A y después por B, se secuencian con el algoritmo de Johnson.

Resultados programación de los sistemas de secuenciación flexibles y JIT

Para llevar a cabo el aplicativo se hará uso del lenguaje VBA de Excel, donde se hizo la programación de cada uno de los sistemas ya mencionados anteriormente, tanto para producción flexible como para Just In Time.

Flow Shop

Una máquina

Para una máquina se hizo la programación de cada una de las reglas simples ya mencionadas anteriormente: FCFS, SPT, EDD, WSPT, Weights y Criticar Ratio, en las cuales se utilizó el siguiente ejemplo de una empresa manufacturera que tiene 10 tareas por realizar:



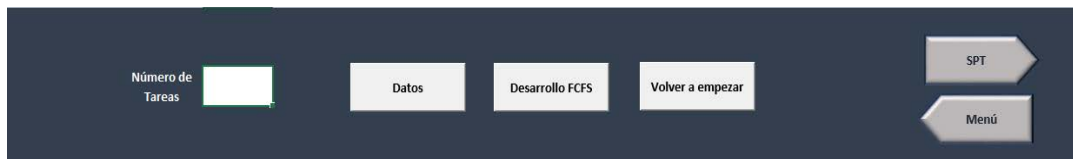
Tabla 2. Tareas empresa manufacturera con tiempo de procesamiento, de entrega y su respectivo peso

N° Trabajos	Pj	Dj	Wj	Rj
1	20	31	5	0
2	30	38	4	0
3	21	33	5	0
4	22	29	4	0
5	35	27	5	0
6	32	36	4	0
7	28	32	5	0
8	29	31	5	0
9	31	25	4	0
10	26	22	5	0

Fuente: elaboración propia.

La información anterior fue ingresada al aplicativo de la siguiente forma para cada una de las reglas:

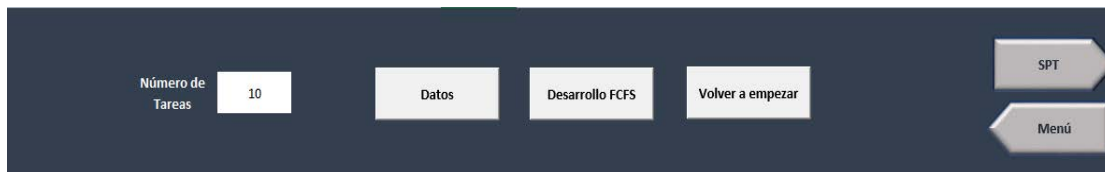
Figura 1. Formato FCFS para ingreso de número de tareas



Fuente: elaboración propia.

Donde el usuario puede ingresar m tareas, la diferencia de cada uno de los aplicativos, es el cambio de regla y su respectivo desarrollo.

Figura 2. Formato FCFS para ingreso de información de cada uno de los tiempos



N° Trabajos	Pj	Dj	Wj	Rj
1	20	31	5	0
2	30	38	4	0
3	21	33	5	0
4	22	29	4	0
5	35	27	5	0
6	32	36	4	0
7	28	32	5	0
8	29	31	5	0
9	31	25	4	0
10	26	22	5	0

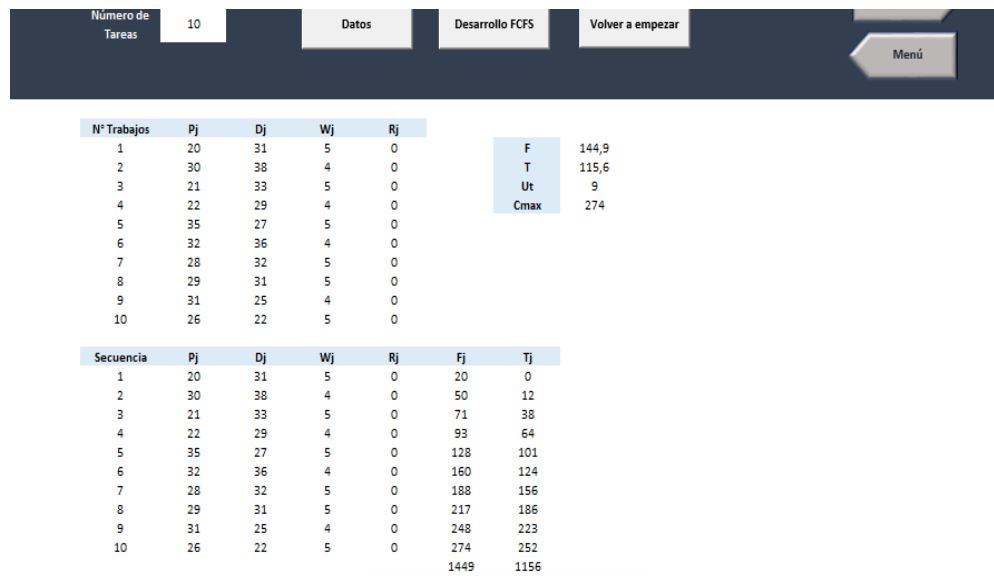
Fuente: elaboración propia.



El usuario ingresa la respectiva información como se muestra en la figura 2, ya habiendo puesto previamente el número de tareas a secuenciar, seguidamente se oprime el botón del desarrollo del modelo, y automáticamente muestra su resultado el cual contiene la secuenciación con sus indicadores de producción

Resultado FCFS

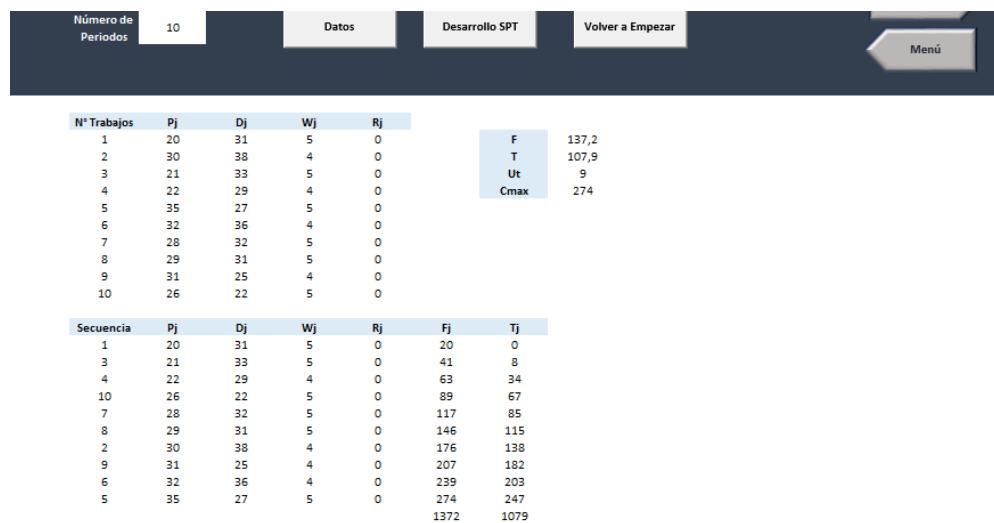
Figura 3. Resultado secuenciación FCFS



Fuente: elaboración propia.

Resultado SPT

Figura 4. Resultado secuenciación SPT



Fuente: elaboración propia.



Resultado EDD

Figura 5. Resultado secuenciación EDD

Número de Periodos	10	Datos	Desarrollo EDD	Volver a empezar	Menú	
N° Trabajos	Pj	Dj	Wj	Rj	F	151,6
1	20	31	5	0	T	121,2
2	30	38	4	0	Ut	10
3	21	33	5	0	Cmax	274
4	22	29	4	0		
5	35	27	5	0		
6	32	36	4	0		
7	28	32	5	0		
8	29	31	5	0		
9	31	25	4	0		
10	26	22	5	0		
Secuencia	Pj	Dj	Wj	Rj	Fj	Tj
10	26	22	5	0	26	4
9	31	25	4	0	57	32
5	35	27	5	0	92	65
4	22	29	4	0	114	85
8	29	31	5	0	143	112
1	20	31	5	0	163	132
7	28	32	5	0	191	159
3	21	33	5	0	212	179
6	32	36	4	0	244	208
2	30	38	4	0	274	236
					1516	1212

Fuente: elaboración propia.

Resultado WSPT

Figura 6. Resultado secuenciación WSPT

Número de Periodos	10	Datos	Desarrollo WSPT	Volver a Empezar	Menú	
N° Trabajos	Pj	Dj	Wj	Rj		
1	20	31	5	0		
2	30	38	4	0		
3	21	33	5	0		
4	22	29	4	0		
5	35	27	5	0		
6	32	36	4	0		
7	28	32	5	0		
8	29	31	5	0		
9	31	25	4	0		
10	26	22	5	0		
Secuencia	Pj	Dj	Wj	Rj	Fj	Tj
1	20	31	5	0	20	0
3	21	33	5	0	41	8
10	26	22	5	0	67	45
4	22	29	4	0	89	60
7	28	32	5	0	117	85
8	29	31	5	0	146	115
5	35	27	5	0	181	154
2	30	38	4	0	211	173
9	31	25	4	0	242	217
6	32	36	4	0	274	238
					1388	1095

Fuente: elaboración propia.



Resultado Weights

Figura 7. Resultado secuenciación Weights

Número de Periodos	10	Datos	Desarrollo Weights	Volver a Empezar	Menú
--------------------	----	-------	--------------------	------------------	------

N° Trabajos	Pj	Dj	Wj	Rj	F	T	Ut	Cmax
1	20	31	5	0				
2	30	38	4	0				
3	21	33	5	0				
4	22	29	4	0				
5	35	27	5	0				
6	32	36	4	0				
7	28	32	5	0				
8	29	31	5	0				
9	31	25	4	0				
10	26	22	5	0				

Secuencia	Pj	Dj	Wj	Rj	Fj	Tj
1	20	31	5	0	20	0
3	21	33	5	0	41	8
5	35	27	5	0	76	49
7	28	32	5	0	104	72
8	29	31	5	0	133	102
10	26	22	5	0	159	137
2	30	38	4	0	189	151
4	22	29	4	0	211	182
6	32	36	4	0	243	207
9	31	25	4	0	274	249
					1450	1157

Fuente: elaboración propia.

Resultado Critical Ratio

Figura 8. Resultado secuenciación CR

Número Periodos	10	Datos	Critical Ratio	Volver a Empezar	Menú
-----------------	----	-------	----------------	------------------	------

N° Trabajos	Pj	Dj	Wj	Rj	F	T	Ut	Cmax
1	20	31	5	0				
2	30	38	4	0				
3	21	33	5	0				
4	22	29	4	0				
5	35	27	5	0				
6	32	36	4	0				
7	28	32	5	0				
8	29	31	5	0				
9	31	25	4	0				
10	26	22	5	0				

Secuencia	Pj	Dj	Wj	Rj	Fj	Tj
1	20	31	5	0		
3	21	33	5	0		
4	22	29	4	0		
10	26	22	5	0		
7	28	32	5	0		
8	29	31	5	0		
2	30	38	4	0		
6	32	36	4	0		
9	31	25	4	0		

Fuente: elaboración propia.



Dos o más máquinas: Johnson

Para la heurística de Johnson se usó la siguiente información para comprobar la funcionalidad del aplicativo, donde en una empresa manufacturera se tienen 5 trabajos para dos máquinas:

Tabla 3. Tareas empresa manufacturera, con tiempo de procesamiento, para cada una de las máquinas

N°Trabajo	Máquina 1	Máquina 2
	Pj1	Pj2
1	8	3
2	2	9
3	14	11
4	5	12
5	15	6

Fuente: elaboración propia.

Al igual que una sola máquina, la herramienta le pide al usuario ingresar el número de tareas a secuenciar, de la siguiente forma:

Figura 9. Ingreso trabajos a secuenciar Johnson

Fuente: elaboración propia.

Habiendo ingresado el número de trabajos a secuenciar, la herramienta le pedirá al usuario ingresar cada uno de los tiempos requeridos por cada máquina para cada trabajo.

Figura 10. Ingreso información Johnson

N°Trabajo	Máquina 1 Pj1
1	
2	
3	
4	
5	

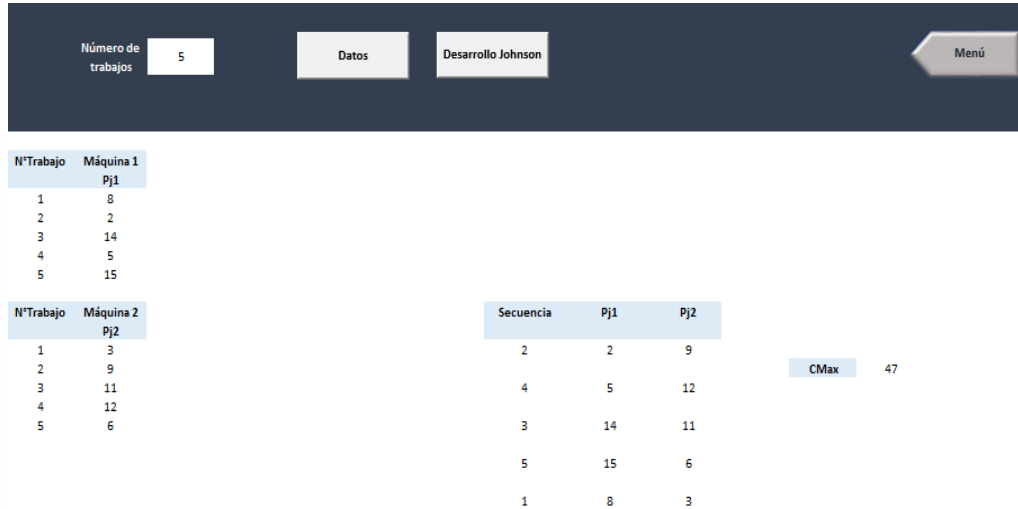
N°Trabajo	Máquina 2 Pj2
1	
2	
3	
4	
5	

Fuente: elaboración propia.

Por último, el usuario debe hacer clic en desarrollo Johnson donde obtendrá su secuencia con su respectivo Cmax.



Figura 11. Resultado Johnson

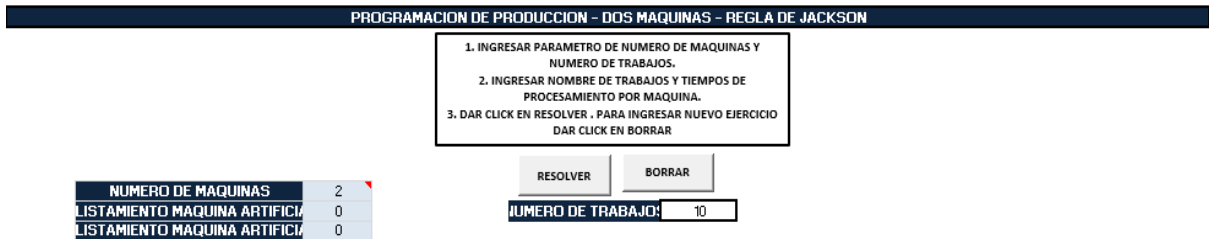


Fuente: elaboración propia.

Job Shop: Jackson

En esta herramienta se encuentran especificadas las instrucciones para que el usuario pueda tener un mejor uso, ya que esta herramienta posee una mayor complejidad. El usuario puede ingresar el número de máquinas y el tiempo de alistamiento de cada una, en este caso se escogieron dos máquinas. Para el ingreso de esta información se tiene el siguiente formato:

Figura 12. Ingreso número de máquinas y trabajos Jackson

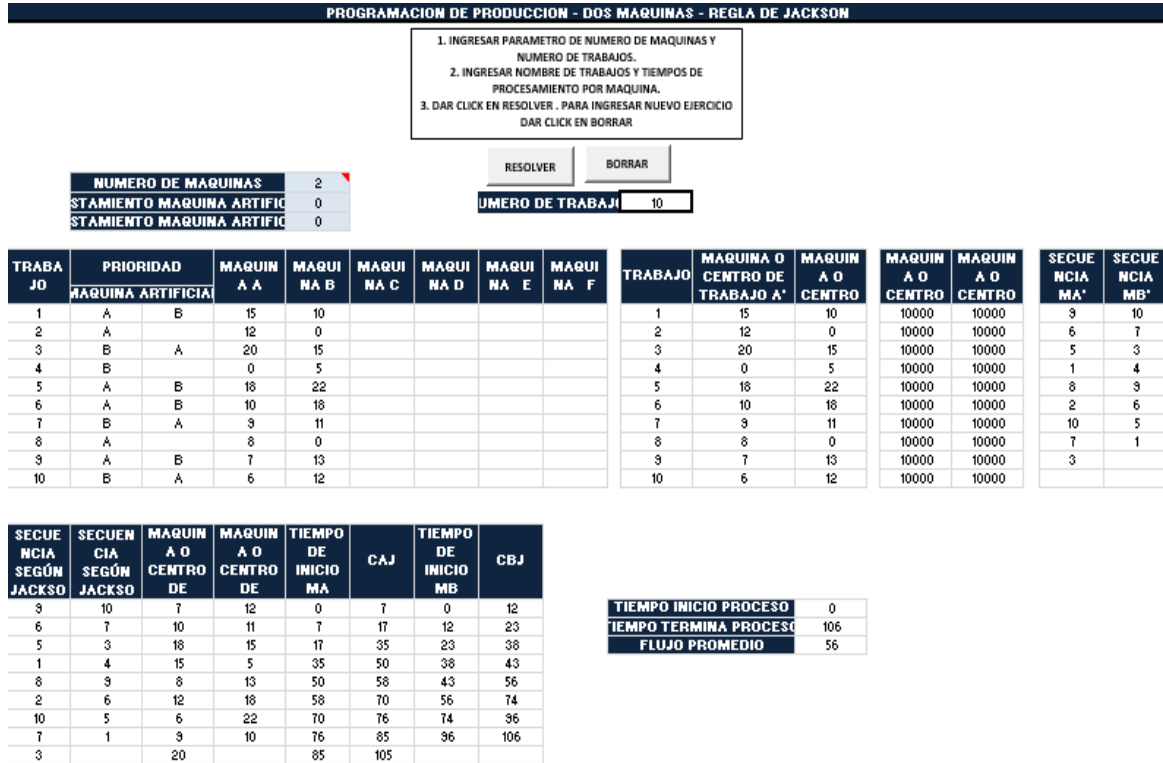


Fuente: elaboración propia.

El usuario al hacer clic en resolver, tendrá la secuenciación completa con tiempo de terminación y flujo promedio:



Figura 13. Resultado Jackson



Fuente: elaboración propia.

Just in Time

Para Monden se tienen dos tipos: tasa de uso por producto y desviaciones unitarizadas, donde se usó un ejemplo de una empresa de lácteos que fabrica 5 productos donde tiene la siguiente demanda, los siguientes recursos y desperdicios:

Tabla 4. Tareas empresa de lácteos, con la demanda de 5 productos con sus respectivos recursos y desperdicios

	PRODUCTO 1	PRODUCTO 2	PRODUCTO 3	PRODUCTO 4	PRODUCTO 5
MPS	2000	1850	2630	1450	2223
Recurso 1	5	6	3	2	1
Recurso 2	2	3	9	8	7
Recurso 3	4	5	6	7	4
Recurso 4	4	5	9	7	8
Recurso 5	8	9	4	2	3
Desperdicio 1	1	0	0	0	0
Desperdicio 2	1	1	0	0	0
Desperdicio 3	0	1	1	0	0
Desperdicio 4	0	0	1	1	0
Desperdicio 5	0	0	0	1	1



Para ambos modelos, se pide la misma información, por lo tanto, se tiene una hoja de ingreso para la información de la siguiente manera:

Figura 14. Ingreso datos iniciales MONDEN

Fuente: elaboración propia.

Donde al ingresar los datos solicitados se obtiene lo siguiente, donde el usuario debe ingresar todos los datos solicitados en las tablas:

Figura 15. Ingreso datos finales MONDEN

Cap. Disponibl	Consumo de Insumos										
	MPS	Recursos1	Recursos2	Recursos3	Recursos4	Recursos5	% Desperd.1	% Desperd.2	% Desperd.3	% Desperd.4	% Desperd.5
Producto1											
Producto2											
Producto3											
Producto4											
Producto5											

Fuente: elaboración propia.

Monden – Tasa de uso por producto

Para obtener esta heurística el usuario debe hacer clic en el botón MONDEN 1, donde le aparecerá la solución de la siguiente manera:

Figura 16. Resultado Monden tasa de uso por producto

	TC	Q	N1	N2	N3	N4	N5	DKmin	SF
Producto 1	0,11	2	20	8	8	8	16	72,4197531	5
Producto 2	0,11891892	2	24	12	10	10	18	64,308642	4
Producto 3	0,08365019	2	12	36	12	18	8	58,0864198	3
Producto 4	0,15172414	1	4	16	7	7	2	50,4197531	2
Producto 5	0,09896536	2	4	28	8	16	6	44,0864198	1
TCMax	0,15172414	9	64	100	45	59	50		
			7,11111111	11,11111111	5	6,55555556	5,55555556		

Fuente: elaboración propia.



Monden – Desviaciones unitarizadas

Para obtener esta heurística el usuario debe hacer clic en el botón MONDEN 2, donde le aparecerá la solución de la siguiente manera:

Figura 17. Resultado Monden desviaciones unitarizadas

MONDEN 2 - DESVIACIONES UNITARIZADAS

← INICIO
← DATOS
LIMPIAR

	TC	Q	N1	N2	N3	N4	N5	DKMin 1	DKMin 2	DKMin 3	DKMin 4	DKMin 5	DKMin 6	DKMin 7	DKMin 8	DKMin 9	SF
Producto 1	0,11	2	20	8	8	8	16	8,50937962	5,29266305	10,7309427	4,93382335	11,6497231	7,19567771	15,2426895	7,6214447	16,03122	Tunidad de Producto 5
Producto 2	0,11831832	2	24	12	10	10	18	8,01926632	2,60578653	3,90510531	3,39025473	11,1875151	5,30193124	13,768366	6,4959627	14,899664	Tunidad de Producto 2
Producto 3	0,08365019	2	12	36	12	18	8	7,62144473	12,8975067	5,42627353	11,8576953	5,10385959	3,73538791	2,00308404	8,5093796	0	Tunidad de Producto 4
Producto 4	0,15172414	1	4	16	7	7	2	7,1006868	13,0388782	5,14241621	12,1218097	5,07109943	10,2848324	5,50869122	8,6073468	4,1231056	Tunidad de Producto 2
Producto 5	0,09896536	2	4	28	8	16	6	6,63976052	13,279521	6,11918658	11,5154218	4,00616808	10,4296586	7,48413961	8,5093796	6,164414	Tunidad de Producto 5
	0,15172414	9	64	100	45	59	50										Tunidad de Producto 1
																	Tunidad de Producto 3

Fuente: elaboración propia.

Miltenburg

Para esta última heurística, se tiene una empresa que tiene 3 productos, el primero con una demanda de 6.000 unidades, el segundo con 6.000 unidades y el tercero con 1.000 unidades, a su vez, cada producto terminado tiene 3 subensambles, 4 componentes y 3 materias primas.

Tabla 5. Descomposición árbol de producto

SUBENSAMBLE	PRODUCTO		
	1	2	3
1	1	0	0
2	1	1	1
3	0	0	4

COMPONENTE	SUBENSAMBLE		
	1	2	3
1	1	0	1
2	1	1	0
3	0	1	0
4	0	0	4

MATERIAS PRIMAS	COMPONENTES		
	2	3	4
1	0	0	1
2	1	0	1
3	0	1	0

Fuente: elaboración propia.

Para el ingreso de datos el usuario debe hacer clic en el botón start como lo muestra la figura 14, donde automáticamente aparecen 4 niveles que es lo que comprende la heurística, y ahí se desplegará una tabla donde el usuario debe hacer su respectivo ingreso de información.

Figura 18. Ingreso datos Miltenburg

Levels START INFORMATION MILTENBURG DELETE AND START AGAIN

Levels	Description	Outputs	Weight
1			
2			
3			
4			

Fuente: elaboración propia.



Después del respectivo ingreso de los datos, se desplegarán cada uno de los niveles ingresados por el usuario dando clic en el botón information, donde deberá ingresar la información restante.

Figura 19. Ingreso información final Miltenburg

Levels	4	START		INFORMATION		MILTENBURG		DELETE AND START AGAIN					
Levels	Description	Outputs	Weight	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4
1	A	3	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4
2	B	3	1				2	3		2			
3	C	4	1				3			3			
4	D	3	1				4			4			

Product	Demand
1	
2	
3	

Fuente: elaboración propia.

Ya para el resultado el usuario deberá hacer clic en el botón MILTENBURG.

Figura 20. Resultado Miltenburg

Levels	4	START		INFORMATION		MILTENBURG		DELETE AND START AGAIN					
Levels	Description	Outputs	Weight	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4
1	A	3	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4
2	B	3	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1
3	C	4	1	1	1	1	2	1	1	0	1	0	1
4	D	3	1	0	0	4	3	0	1	0	1	0	0

Product	Demand
1	6
2	6
3	1

SCHEDULING	
K1	2
K2	1
K3	2
K4	2
K5	1
K6	2
K7	3
K8	1
K9	1
K10	1
K11	2
K12	1
K13	2

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Una vez revisado cada uno de los modelos dados por los sistemas de secuenciación *Just in Time*, *Job Shop*, *Flow Shop* y una máquina, se pudo identificar aquellas variables con las que se hizo el diseño de la herramienta, así mismo con las que se logró que el aplicativo analizara cada sistema dando la solución óptima en cada uno.

Una vez estructurado el aplicativo se llevó a cabo una evolución por medio de un caso de estudio o ejemplo en el que no solo se dio validez a la funcionalidad de este, sino que también se logró el objeto de analizar los componentes que hacen parte de un árbol de producto y como este hace parte de la secuenciación.



Referencias

- Bautista, J., Cano, J., & Pereira, J. (2003). Secuenciación de unidades en una línea de montaje minimizando el trabajo perdido. *27 Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa*, 17.
- Cheng, T., & Podolsky, S. (1996). Just-In-Time Manufacturing: An Introduction. In T. Cheng & S. Podolsky (Editores). *Just-In-Time Manufacturing: An Introduction*, (p. 257). Great Britain: Chapman & Hall.
- Sumichrast, R., & Russell, R. (1990). *Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for just-in-time production systems*. Journal of Operations Management.
- Hutchins, D. (1988). Just in Time. In D. Hutchins (Editores). *Just in Time*, (p. 231). Great Britain: Gower Technical Press.
- Józefowska, J. (2007). *Just-in-Time Scheduling: Models and Algorithms for Computer and manufacturing systems*. New York: Springer.
- Kuhpfahl, J. (2016). Job Shop Scheduling with Consideration of Due Dates. In J. Kuhpfahl (Editores). *Job Shop Scheduling with Consideration of Due Dates* (p. 190). Halle, Germany: Universität Halle-Wittenberg.
- Springer, B. H. (1998). *Business Process Engineering*. New York: Springer.
- Miltenburg, J., & Sinnamon, G. (2007). Scheduling mixed-model multi-level just-in-time production systems. *International Journal of Production Research*, 22



Una comparación y análisis de la predicción de las series de tiempo a partir de la optimización de la función de activación y de los pesos del vector de entrada de una red neuronal

Andrés Felipe Caballero Urrego⁵

Resumen

Los constantes cambios y fluctuaciones que en la actualidad presentan las demandas de los productos y los comportamientos dinámicos que son más allegados a la realidad, hacen que se generen nuevos modelos que sean capaces de predecir las nuevas series de tiempo con gran precisión, en respuesta a estas solicitudes se presenta un modelo de red neuronal basado en el análisis de las comparaciones de los resultados obtenidos después de realizar una optimización no lineal en los pesos del vector de entrada, de tal manera que se puedan llegar a definir nuevas funciones de activación que minimicen el error en la predicción de series de tiempo.

La precisión en la predicción de series de tiempo radica en la minimización del error durante las fases de prueba que se le realicen al modelo, en consecuencia, para lograr obtener el error más pequeño se parte de la construcción de una red neuronal y del uso de las funciones de activación más conocidas, se procede a optimizarla mediante el concepto de la derivada, obteniendo así un nuevo grupo de funciones de activación; para generar otro grupo de resultados se optimizan los pesos de vector de entrada de la red mediante el uso de SOLVER de optimización no lineal; de esta manera se generan 24 predicciones de una serie de tiempo de las cuales se hace una comparación tomando como referencia el EPAM; así, se determina una red neuronal que mediante una nueva función de activación y un conjunto de pesos optimizado minimice el error en la predicción de series de tiempo.

En vista que desde la revisión bibliográfica no se obtuvo un documento en el que se compararan y analizaran los componentes optimizables de una red neuronal, el presente trabajo busca realizar una comparación y análisis de los resultados en la predicción de series de tiempo obtenidos a partir de la optimización de la función de activación y de los pesos del vector de entrada de la red.

Palabras clave: pronósticos, redes neuronales artificiales, función de activación.

Introducción

La predicción de series de tiempo es una materia que ha ganado importancia en los últimos años para responder a las constantes fluctuaciones y cambios que presentan las demandas actuales de

⁵ Grupo PIT - Producción, Innovación y Tecnología. Universidad Militar Nueva Granada. Correo electrónico: u2902728@unimilitar.edu.co



productos y servicios; de la misma manera, son una materia importante de estudio al convertirse en un factor de análisis para la toma de decisiones estratégicas. Dentro del tema en estudio se encuentran distintas herramientas que permiten obtener precisión en los pronósticos, dependiendo de la serie de tiempo que se esté analizando. En búsqueda de la precisión en los modelos de pronóstico se generan constantes cambios, usos de otras herramientas y propuestas, dentro de estas propuestas se encuentran las redes neuronales que se postulan como una herramienta reciente y que responde bien a la predicción de series de tiempo.

Modelos lineales como promedios móviles, suavización exponencial y ARIMA han dominado el campo de la predicción de series de tiempo por un largo periodo y se han hecho aplicaciones reales (Aras y DevciKocakoç, 2016) Así mismo se proponen modelos no lineales como TAR (Threshold Autoregressive) y GARCH (Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedastic). Estos modelos presentan la problemática de especificar una relación funcional no lineal entre las variables, lo cual ha restringido su uso en algunas áreas específicas.

Dadas las implicaciones anteriores surgen métodos flexibles como las redes neuronales cuyas características permiten superar los problemas de los métodos mencionados. Haciendo uso de las redes neuronales con una sola capa oculta se pueden realizar importantes aproximaciones a cualquier función, de la misma manera numerosas aplicaciones exitosas en pronósticos postulan a las redes neuronales como una herramienta importante (Zhang, Patuwo Y Hu, 1998).

Ampliar la gama de herramientas para hacer pronósticos en la predicción de series de tiempo a través de las redes neuronales es una de las consignas de este artículo para contribuir con el intento de hacer más grande la variedad de funciones de activación dentro de una red neuronal.

Muchas comparaciones se han realizado entre redes neuronales y los métodos tradicionales de predicción de series de tiempo; de estas comparaciones se han arrojado dos tipos de conclusiones, unas favorables a las redes neuronales, como lo muestra (Tang y Almeida, 1991; Hill, O'connor y Remus, 1996; (Hu, Zhang, Jiang y Patuwo, 1999; Zhang y Qi, 2005) y otras favorables a los métodos tradicionales de acuerdo con (Brace, Schmidt, y Hadlin, 1991; Foster, Collopy y Ungar, 1992; Gorr, Nagin y Szczypula, 1994; Callen, Kwan, Yip y Yuan, 1996). Teniendo en cuenta esas comparaciones expuestas, se observa que se contribuye al estudio haciendo una comparación entre las mismas redes neuronales, esto a través de los cambios en las funciones de activación en las capas ocultas, convirtiéndose lo anterior en objetivo del artículo.

El artículo está compuesto por un marco teórico en el punto 2 para entender el funcionamiento de una red neuronal y en donde se da una nueva vista a lo que se ha hecho con estas, en el punto 3 se encuentra la aplicación de los modelos de redes conocidas a una serie de tiempo y de la aplicación de las nuevas funciones propuestas, en el punto 4 se presenta un análisis de los resultados obtenidos luego de la aplicación y finalmente en el punto 5 las conclusiones.



Marco teórico

El marco teórico está dividido en dos secciones, una primera parte en donde se expone la variedad de conceptos propuestos para las redes neuronales, pero que al final convergen a uno mismo y una segunda parte dedicada a exponer ejemplos en donde se han aplicado las redes neuronales en *forecasting*.

Realizando en primer lugar la recolección de definiciones acerca de las redes neuronales artificiales (Matich, 2001) propone que las redes neuronales son más que otra forma de emular ciertas características propias de los humanos, como la capacidad de memorizar y de asociar hechos. Si se examinan con atención aquellos problemas que no pueden expresarse a través de un algoritmo, se observará que todos ellos tienen una característica en común: la experiencia; aquí el autor hace referencia a un aspecto importante en el desarrollo del trabajo, lo cual será un ítem a tener en cuenta al momento de realizar las corridas y proceso de aprendizaje del modelo; de esta manera el autor también propone que los humanos presentan capacidad de aprendizaje. Aprendizaje significa que aquellos problemas que inicialmente no pueden resolverse pueden ser resueltos después de obtener más información acerca del problema. Por lo tanto, las redes neuronales:

- Consisten de unidades de procesamiento que intercambian datos o información.
- Se utilizan para reconocer patrones, incluyendo imágenes, manuscritos y secuencias de tiempo (por ejemplo: tendencias financieras).
- Tienen capacidad de aprender y mejorar su funcionamiento.

Dentro de las ventajas que ofrece una red neuronal se pueden tener:

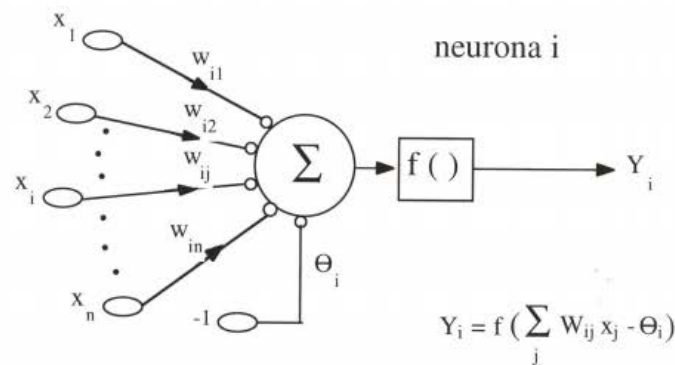
- Aprendizaje adaptativo. Capacidad de aprender a realizar tareas basadas en un entrenamiento o en una experiencia inicial.
- Auto-organización. Una red neuronal puede crear su propia organización o representación de la información que recibe mediante una etapa de aprendizaje.
- Tolerancia a fallos. La destrucción parcial de una red conduce a una degradación de su estructura; sin embargo, algunas capacidades de la red se pueden retener, incluso sufriendo un gran daño.
- Operación en tiempo real. Los cómputos neuronales pueden ser realizados en paralelo; para esto se diseñan y fabrican máquinas con hardware especial para obtener esta capacidad.
- Fácil inserción dentro de la tecnología existente. Se pueden obtener chips especializados para redes neuronales que mejoran su capacidad en ciertas tareas. Ello facilitará la integración modular en los sistemas existentes.

Desde el punto de vista formal, una RNA puede definirse haciendo uso del concepto de grafo, así las cosas, se puede definir lo siguiente:



- A cada nodo j se le asocia una variable de estado X_i .
- A cada conexión (i,j) de los nodos i y j se le asocia un peso W que pertenece a los reales.
- En muchas ocasiones a cada nodo se le asocia un umbral de disparo θ_j .
- Para cada nodo j se define una función $f(x,w,\theta)$, que depende de los pesos de sus conexiones, del umbral y de los estados de los nodos i a él conectados. Esta función proporciona el nuevo estado del nodo.

Figura 1. Modelo de neurona estándar



Fuente: Brio y Serrano (1995).

Una vez entendido de manera general el concepto de una red neuronal y la ilustración de una neurona, es importante ver ahora por qué elementos está compuesta una red y los aspectos importantes para entender su funcionamiento.

En López y Fernández (2008) se proponen elementos y características principales una RNA, como ya se sabe el componente principal de la red es una unidad de procesamiento llamada neurona la cual a partir de un vector de entrada o bien sea por la activación de otra neurona proporcionan una respuesta (*output*). Dentro de una red neuronal se distinguen 3 capas (o tipos de neuronas), capa de entrada, capas oculta y capa de salida; la capa de entrada recibe señales del entorno o del vector de entrada, las neuronas ubicadas en la capa oculta reciben y brindan salidas desde y hacia el interior del sistema sin tener algún contacto con el exterior, en ellas se lleva a cabo el procesamiento de información; desde la capa de salida se enviara una señal fuera del sistema lo cual termina siendo el resultado que arroja la red.

Como ya se definió anteriormente, de manera formal ponemos la RNA como el producto escalar de los vectores de entrada y los pesos de la red; ahora bien, aquí se introduce un nuevo concepto denotado como la función de activación, la cual combina la entrada de la j -ésima neurona obtenido a partir de los estímulos y pesos recibidos con el estado inicial de la neurona $[a_j(t-1)]$ para producir un nuevo estado. Con base a la información recibida, se pueden distinguir 6 funciones de activación como las más conocidas:



1. Función lineal o identidad, que devuelve directamente el valor de activación de la neurona.
2. Función escalón o signo, que representa salidas binarias. En este caso, si la activación de la neurona es inferior a un determinado umbral proporciona una determinada salida, en caso de que sea igual o superior a dicho umbral, proporcionará otra salida.
3. Función mixta o lineal a tramos, en esta función se establecen dos límites, inferior y superior, si la función arroja un valor inferior al límite inferior se emite una determinada salida, si la activación es igual o superior que el límite superior se emite otra salida, en caso de que la función determine un valor entre los límites se traduce en una función identidad.
4. Función sigmoidea, está definida en un intervalo, entre las más comunes se encuentran la función sigmoide, función tangente hiperbólica y función sigmoide modificada; estas funciones tienen la característica de que siempre presentan una derivada positiva e igual a cero en sus límites asintóticos, teniendo en cuenta lo anterior se posibilita el entrenamiento con algoritmos avanzados.
5. Función Gaussiana, se suelen aplicar en redes con m capas ocultas ($m > 2$) que requieren reglas de propagación basadas en el cálculo de distancias cuadráticas entre los vectores de entrada y los pesos de la red.
6. Función Sinusoidal, genera salidas continuas en el intervalo $[-1,1]$. Estas funciones suelen emplearse en los casos en los que se requiere explícitamente una periodicidad temporal.

Entendidos los componentes de una red neuronal y vislumbrando en la primera parte algunas aplicaciones, damos paso a la aplicación que nos compete en el trabajo, la relacionada con la predicción de series de tiempo.

Es importante partir de que el *Forecasting* se convierte en una entrada fundamental para realizar la toma de decisiones estratégicas y operacionales como lo establece Spyros (1996), dado lo anterior, es común encontrar metodologías soportadas por la estadística y la inteligencia artificial a fin de disminuir siempre la incertidumbre en la toma de decisiones.

En Gooijera y Hyndman (2006), se presenta un estudio del progreso obtenido en los últimos 25 años con respecto a técnicas como las redes neuronales artificiales, suavización exponencial simple y algunas combinaciones, esto con el fin de informar al lector sobre la evolución que se ha venido dando en el estudio de estas metodologías. La combinación de modelos se ha vuelto común, por ejemplo en Tealab, Hefny y Badr (2017) se estudian modelos como ARNN (autoregressive neural network) y NARMA (Nonlinear moving average), estos modelos surgen de la necesidad de hacer predicciones más allegadas a la realidad, en donde los componentes de no linealidad están presentes y los comportamientos dinámicos se vuelven comunes, de esta manera en este artículo se asume el reto de usar la inteligencia artificial combinada con modelos de auto regresión y promedios móviles para hacer predicciones de series de tiempo.

Velásquez, Zambrano y Franco (2013), proponen una comparación entre el método de suavización exponencial y redes neuronales para la predicción de series de tiempo en la venta de papel y la demanda de electricidad, estas demandas presentaban un componente de tendencia y



estacionalidad que al momento de hacer uso de las redes neuronales fueron eliminados, lo cual permitió dar más precisión al modelo. Uno de los retos que se quiere asumir es poder predecir demandas de cualquier tipo, es decir, aproximarse a lo hecho por Tealab, Hefny y Badr (2017), pero sin dejar de lado las series de tiempo propuestas por Velásquez, Zambrano y Franco. Estos ejemplos expuestos y otros casos (dentro de muchos) de predicciones de series tiempo como los de Aras DeveciKocakoç (2016), Pradeepkumar y VadlamaniRavia (2016) y Teixeira y Fernandes (2014) dejan ver lo que se ha hecho hasta el momento, combinando modelos, usando formas de optimización para predecir volatilidad y haciendo comparaciones con otros métodos para hacer aportes importantes a la hora de buscar precisión y confiabilidad en los modelos de tal manera que se conviertan en entradas con poca incertidumbre para la toma de decisiones.

Aplicación de modelos

En este punto se tratarán 4 conjuntos de modelos a fin de compararlos, analizarlos y obtener un resultado que permita proponer una función de activación que minimice el error y así mismo proponer nuevas funciones de activación que respondan bien al ajustarse a las series de tiempo.

El inicio del funcionamiento de la red es igual para todos los siguientes puntos; se tiene un histórico de una serie de tiempo que para el presente trabajo se trata del precio diario del dólar en Colombia durante el último año (Banco de la República, 2018), una serie de pesos que inicialmente se ponen aleatoriamente y que se irán ajustando paulatinamente, se genera un diferencial de los datos históricos, los cuales se traducen en un porcentaje respecto al dato anterior. Con un conjunto de datos inicial de 300 datos, se dividen en grupos de 30 para generar el primer dato que va a ingresar a la capa oculta de la red, este dato se genera con la función ya expuesta en el marco teórico ($\sum W_i X_i$ con $i = 1, 2, \dots, n$); a este dato se le aplicará la función de activación y es en este punto en donde se harán las comparaciones y se propondrán nuevas funciones.

Funciones conocidas

Las funciones que se van a tratar en este punto y que serán base para el desarrollo de los demás son tangente hiperbólica, sigmoidea, gaussiana, sinusoidal, lineal, escalón y la función identidad. Siguiendo los pasos mencionados anteriormente y teniendo como factor diferenciador la función de activación, se generan modelos para ser estudiados de acuerdo con la calidad de ajuste que se tenga a la serie de tiempo. En este punto se generan los siguientes errores del EPAM:

Tabla 1. Errores del EPAM

	TGH	Sigmoidea	Gausiana	Sinusoidal	Lineal	Escalón	Identidad
Conocida	0,00747373	0,50021702	0,10017	0,00267867	0,007474214	0,48654958	0,00854252

Fuente: elaboración propia.



El color verde indica que el ajuste que se dio con estas funciones es aceptable y que por consiguiente generan mayor expectativa al continuar el estudio; se rescata de dichas funciones que intentan perseguir el comportamiento real de la serie de tiempo y que en consecuencia con un ajuste adecuado en los pesos del vector entrada el comportamiento mejore. Por otra parte, el color rojo indica que no se obtiene ningún tipo de aproximación a la serie de tiempo. Para el caso de la función escalón se observa que logra aproximaciones muy buenas, pero en algunos tramos, por lo que es motivo de estudio dichas secciones para la correspondiente explicación del fenómeno.

A partir de estos datos se podrán generar las comparaciones y análisis; las convenciones en cuanto a colores funcionan igual para los siguientes puntos.

Pesos de entrada optimizados

Mediante el uso de SOLVER con un motor de optimización no lineal, teniendo a las celdas cambiantes como los pesos que en un principio fueron establecidos aleatoriamente, la función objetivo como minimizar el error EPAM y sacando provecho de la posibilidad de correr el software sin restricción alguna, se generan nuevos pesos que en teoría son los que minimizan el error. A continuación, se presentan los resultados en este punto.

Tabla 2. Primeros Resultados

	TGH	SIGMOIDEA	GAUSIANA	SINUSOIDAL	LINEAL	ESCALON	IDENTIDAD
CONOCIDA (P)	0,00018377	0,36338202	0,00433973	7,6416E-05	7,97061E-05	0,47383672	0,00266621

Funciones conocidas optimizadas mediante derivada

En este punto es donde se genera la propuesta de nuevas funciones de activación, teniendo en cuenta que a partir de la derivada de una función se encuentran puntos críticos y por consiguiente se convierte una vía para la optimización. De este modo a partir de la función de tangente hiperbólico se estudia la función secante hiperbólico; de la misma manera se obtienen las funciones $y = \frac{e^x}{(1+e^{-x})^2}$, $y = -Ae^{-Bx^2} 2bx$ y $y = A \cos(\omega x + \theta)$. Utilizando estas nuevas funciones como funciones de activaciones los errores que se obtienen son los siguientes:

Tabla 3. Errores obtenidos de las nuevas funciones

	TGH	SIGMOIDEA	GAUSIANA	SINUSOIDAL
DERIVADA	1,00022989	0,25019695	0,0036659	0,00267247

Fuente: elaboración propia.

Se hace necesario resaltar que en este punto no se consideran las funciones lineales, escalón e identidad por razones que serán expuestas en el punto 4.



Optimización en los pesos mediante la derivada

Partiendo de las nuevas funciones de activación obtenidas anteriormente, se puede ahora hacer una optimización de los pesos mediante el uso de SOLVER con el motor de optimización no lineal, de tal manera que se pueda repetir el procedimiento en el punto 3.2, pero ahora con la propuesta de nuevas funciones de activación en la capa oculta de la red. Los errores que se obtienen se muestran a continuación.

Tabla 4. Comparación de funciones

	TGH	SIGMOIDEA	GAUSIANA	SINUSOIDAL
DERIVADA (P)	1,00005556	0,25020287	8,262E-06	0,00267247

Fuente: elaboración propia.

Análisis de ajustes de los conjuntos de modelos

Al comparar los resultados de los errores obtenidos, específicamente el EPAM, luego de realizar las diferentes aplicaciones de los modelos, se presenta el siguiente consolidado:

Tabla 5. Consolidado resultados

		TGH	SIGMOIDEA	GAUSIANA	SINUSOIDAL	LINEAL	ESCALON	IDENTIDAD
EPAM	CONOCIDA	0,00747373	0,50021702	0,10017	0,00267867	0,007474214	0,48654958	0,00854252
	CONOCIDA (P)	0,00018377	0,36338202	0,00433973	7,6416E-05	7,97061E-05	0,47383672	0,00266621
	DERIVADA	1,00022989	0,25019695	0,0036659	0,00267247			
	DERIVADA (P)	1,00005556	0,25020287	8,262E-06	0,00267247			

Fuente: elaboración propia.

Para empezar, el conjunto de funciones de activación que se obtienen a partir de la derivada son logradas solamente del estudio de las funciones: tangente hiperbólica, sigmoidea, gaussiana y sinusoidal, en primer lugar, porque son funciones derivables y en segundo lugar porque las demás funciones (lineal, escalón e identidad) dependían de una constante o solamente de x, lo que en consecuencia significa una derivada igual a 0 o a 1, lo anterior conlleva a que no se consideren como objetos que puedan ser optimizados en el marco del estudio en desarrollo.

Haciendo una comparación de los resultados, se observa que la función que obtuvo el mejor desempeño es la gaussiana, luego de ser derivada y obtener un vector de entrada con pesos optimizados para la serie de tiempo en estudio, de igual manera se evidencia que es la única función que responde satisfactoriamente al concepto de la derivada.

Al optimizar los pesos del vector de entrada, luego de haber realizado las derivadas no se obtiene respuesta satisfactoria en la mejora del error; nuevamente la única función que presenta una mejora en el ajuste en aras de la minimización del error es la función gaussiana.



Por el contrario, las demás funciones (sinusoidal, sigmoidea y tangente hiperbólico) empeoran su desempeño, fenómeno atribuido al tipo de motor de optimización que se usó.

El caso de la función sinusoidal luego de ser derivada y optimizados los pesos en el vector de entrada, presenta un comportamiento que a la vista sigue el comportamiento de la serie de tiempo real; lo ocurrido en este caso y motivo por el cual es marcada en rojo es que el pronóstico que se genera –en este caso un paso adelante– se convierte en un dato muy similar o igual al inmediatamente anterior, luego el fenómeno que se produce es un pronóstico (un paso adelante) que tiene como resultado el último dato de la serie temporal; dicha cuestión no es aporte importante en el marco del estudio y del tipo de pronóstico que se está intentando generar, un pronóstico que sea más acercado a la realidad. Con la función identidad (con pesos optimizados) ocurre exactamente la misma situación, motivo por el cual también se marca en rojo.

Hasta este punto se puede señalar una cuestión importante, cuando el resultado de la desviación generada por la función de activación se acerca mucho a 1 será muy difícil llegar a lograr un ajuste, debido a que el pronóstico que se hace un paso adelante se acercará al doble del dato inmediatamente anterior de la serie temporal real; por otra parte, cuando desviación generada por la función de activación se acerca mucho a 0 ocurre el fenómeno expuesto en párrafo anterior.

Del análisis anterior se postula a $y = -Ae^{-Bx^2} 2bx$ como la función con mejor desempeño en cuanto al ajuste se refiere, es decir, para el caso específico que se está trabajando, con una serie de tiempo definida como el precio del dólar en Colombia en el último año, se obtiene que la función de activación (entre las estudiadas) que mejor logra ajustar los datos es $y = -Ae^{-Bx^2} 2bx$; dicha función es propuesta fundamental del presente artículo, con el fin de ampliar la gama de funciones dentro del marco de la predicción de series de tiempo a través de redes neuronales.

Finalmente, al evidenciar que las nuevas funciones: $y = \frac{e^x}{(1+e^{-x})^2}$, $y = A \cos(\omega x + \theta)$ ω y $y = \text{sech}^2(x)$ no logran el ajuste que se esperaba con la serie temporal resulta conveniente dejarlo como una fuente de información a tener en cuenta a la hora de abordar futuros trabajos relacionados con el tema. Ahora bien, es de vital importancia señalar que en este caso en específico las funciones no logran ajustar los datos, pero pueden existir casos en los que las funciones generen una buena respuesta en cuanto ajuste se refiere y puedan aportar satisfactoriamente en el estudio de otro tipo de series temporales, luego con estas funciones la discusión queda abierta.

Pronóstico

Para explicar este punto se introducirán dos conceptos, el primero trata de la manera en cómo se comparan los datos de una serie temporal y el segundo el concepto de la función de autocorrelación y la función de autocorrelación parcial



Existen varias maneras de hacer comparaciones entre los datos de una serie temporal, por ejemplo, en economía suelen hacerse las comparaciones con respecto a un año base o de un mismo mes en años anteriores o de un mismo día en semanas anteriores. La manera en que se analicen y se les haga tratamiento a los datos es propuesta del sujeto que este analizando la serie temporal, sin embargo, resulta conveniente conocer que periodos se están analizando, por ejemplo, si los datos corresponden a una demanda mensual las comparaciones deberían hacerse con el mismo mes del año anterior, o si se tiene el caso con demandas diarias resultaría importante comparar con el dato de inicio del mes o con el mismo día, pero de la semana anterior. Para el caso en estudio, tratándose de una divisa se optará por la comparación expuesta en última instancia (Seruzier, 2003).

La función de autocorrelación expresada como $r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (y_t - \bar{y})(y_{t-k} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^{n-k} (y_t - \bar{y})^2}$ con k periodos de retraso, indica el tipo y grado de correlación del dato en estudio con el histórico de k periodos. Por su parte la función de autocorrelación parcial indica la dependencia del dato en estudio con un dato que se encuentre k periodos atrás, es decir la correlación de y_{t-2} con y_t , sin tener en cuenta los posibles aportes que haga y_{t-1} . Dicha función es expresada como:

$$r_{k,k} = \frac{r_k - \sum_{j=1}^{k-1} r_{k-1,j} * r_{k-j}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} r_{k-1,j} * r_{k-j}}$$

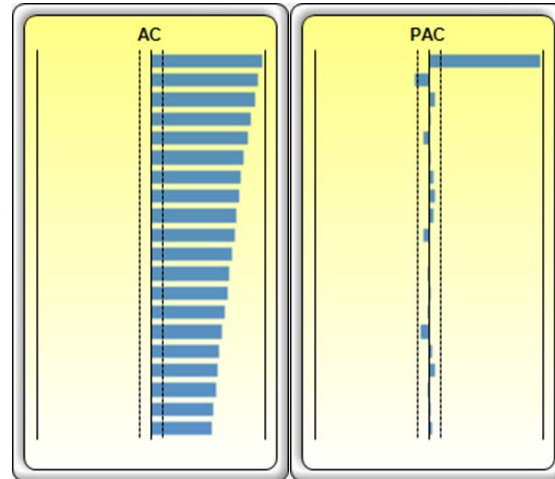
(Universidad Autonoma de Madrid, 2004)

Introducidos los dos conceptos se procede a explicar la manera en que se realizó el pronóstico, en este caso siete periodos adelante, intentando emular el comportamiento de la divisa en la semana siguiente. El proceso inicia con la captura del ultimo valor de la serie de tiempo para efectuarle dos comparaciones, la primera haciendo uso la función de autocorrelación parcial para determinar un bloque de correlaciones que concluya si el dato en estudio tiene relación o depende de cada uno de los datos de la semana pasada y una segunda comparación que se hace mediante la función de autocorrelación para determinar si el dato en estudio depende del histórico de lo que va corrido de la semana; si las dos comparaciones anteriores son afirmativas, es decir, sí dependen de datos anteriores se procede a obtener un diferencial entre el dato en estudio y su semejante de la semana anterior, dicho diferencial será expresado como proporción del dato anterior y finalmente a esta última expresión se le aplicará la función de activación obtenida en el punto 4. En el caso de que las dos comparaciones dictaminen que no existe relación alguna con el histórico, el pronóstico será generado con base a las desviaciones generadas por la función de activación en los datos semejantes de la semana previa.

A continuación se presentan los correlogramas de las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial, los cuales han sido obtenidos mediante la herramienta risk simulator.



Figura 2. Funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial



Fuente: elaboración propia.

Para mayor claridad de los datos se presenta la siguiente tabla con los valores de la función de autocorrelación y autocorrelación parcial para los 20 periodos previos al último dato de la serie temporal:

Tabla 5. Resultados de coeficientes de autocorrelación y autocorrelación parcial

Tiempo	AC	PAC
1	0,9718	0,9718
2	0,9373	(0,1289)
3	0,9061	0,0562
4	0,8770	0,0064
5	0,8460	(0,0539)
6	0,8159	0,0119
7	0,7895	0,0439
8	0,7677	0,0547
9	0,7490	0,0368
10	0,7282	(0,0511)
11	0,7069	(0,0054)
12	0,6861	(0,0071)
13	0,6669	0,0150
14	0,6472	(0,0139)
15	0,6234	(0,0723)
16	0,6009	0,0281
17	0,5826	0,0444
18	0,5649	(0,0180)
19	0,5473	0,0088
20	0,5314	0,0206

Fuente: elaboración propia.



Con respecto a la función de autocorrelación se puede concluir que al menos los 20 periodos previos al último dato de la serie de tiempo afectan el dato en estudio; es decir la variación de incrementos históricos afecta incrementando la serie temporal, luego la primera comparación resulta ser acertada. De la función de autocorrelación parcial hay que tener en cuenta que es una función que se basa en la dependencia del dato en estudio con un dato histórico en específico, es común encontrar correlogramas en los que PAC tenga como valor significativo solamente el primer dato, como se expresa en Casado (2006), por otra parte al tratarse esta función de una herramienta propia de los modelos ARMA y que sirve como base para determinar los parámetros p y q de un modelo ARMA, el reporte auto ARIMA ofrecido por Risk Simulator deja entrever una inclinación hacia los parámetros $p=1$ y $q=1$, con los cuales se alcanza el mejor coeficiente de determinación y se obtienen uno de los mejores criterios AKAIKE y SCHWARZ de entre los modelos propuestos. Ahora bien, esto nos lleva a compartir el concepto de Universitat de les Illes Balears, que expresa que MA(1) conserva la correlación en periodos inmediatamente sucesivos (y_t, y_{t-1}) y se elimina cuando los periodos de retraso son superiores al parámetro (q); esto concluye en un modelo de memoria limitada; razón por la cual se explica que solamente el primer dato del correlograma de PAC se considere significativo.

Una vez realizadas las comparaciones de donde se determina que efectivamente el último dato de la serie temporal depende del histórico, se procede a generar el pronóstico teniendo en cuenta los datos de los mismos días, pero de la semana anterior. Con el último dato de la serie y su semejante de la semana pasada se genera un diferencial que es traducido en proporción con respecto al dato más antiguo de los dos que se están trabajando. Una vez obtenido este porcentaje se produce una desviación mediante la función $y = -Ae^{-Bx^2} 2bx$; dicha desviación será sumada al dato de la semana previa y de esta manera se genera el pronóstico.

Resultados

Realizado lo expuesto en el punto anterior, se genera el siguiente pronóstico (representado después de la línea roja punteada):



Figura 3. Pronóstico realizado con función de activación $y = -Ae^{(-Bx^2)} 2bx$



Fuente: elaboración propia.

Para mayor claridad de los datos se presentan a continuación:

Tabla 6. Pronósticos 7 periodos adelante

F1	\$ 2.786,30
F2	\$ 2.795,44
F3	\$ 2.792,64
F4	\$ 2.793,85
F5	\$ 2.792,36
F6	\$ 2.792,36
F7	\$ 2.804,90

Fuente: elaboración propia.

Nótese que son datos que de cualquier manera pueden llegar a ser ciertos, es decir logran una afinidad con el componente realista del comportamiento de una divisa, de esta manera se responde al objetivo planteado al inicio a cerca de la necesidad de generar pronósticos allegados a la realidad.

Ahora bien, es de vital importancia resaltar que en todo pronóstico hay variables endógenas o del sector que claramente no son controlables y que en consecuencia afectan el comportamiento de una serie temporal. El trabajo realizado se limita al estudio netamente de variables cuantitativas, es decir, es un estudio matemático que se hace directamente a los datos teniendo en cuenta su comportamiento histórico.

Finalmente se establece que los resultados de este trabajo se pueden resumir en dos secciones, la primera estipula que para el caso de los datos que se trabajaron, la función que mejor se logró ajustar fue $y = -Ae^{-Bx^2} 2bx$ (función que se convierte en propuesta de este artículo); se proponen otras funciones que en este caso no se ajustan bien pero son válidas y llamadas a ser probadas en otro tipo de series de tiempo y la segunda establece que se logra generar un pronóstico realista combinando los conceptos de función de autocorrelación y función de autocorrelación parcial con el concepto de red neuronal haciendo uso de la principal función de activación propuesta en el artículo.



Conclusiones

- Se lograron establecer nuevas funciones de activación que responden igual o mejor que las ya conocidas.
- La optimización en los pesos de entrada a la red neuronal no siempre propiciará una disminución en el error.
- Se amplía la gama de herramientas en cuanto a funciones de activación de las redes neuronales, lo cual contribuye a la discusión y análisis de la herramienta para hacer pronósticos.
- Se realizó la comparación de funciones ya conocidas con funciones nuevas con lo cual se conciben nuevas formas de usar las redes neuronales para *Forecasting*.
- El desempeño de las funciones en cuanto al ajuste con los datos, varía dependiendo del tipo de serie temporal que se esté trabajando.
- Se reafirma la tendencia que se tiene hacia el uso de modelos híbridos para la predicción de series de tiempo.

Referencias

- Aldabas, E. (1995). Introducción al reconocimiento de patrones. *Universidad Popular del Cesar*.
- Aras, S., & DeveciKocakoç, İ. (22 de enero de 2016). A new model selection strategy in time series forecasting with artificial neural networks: IHTS. *Neurocomputing, volumen 174*, 974-987.
- Aras, S., & DeveciKocakoç, İ. (22 de enero de 2016). A new model selection strategy in time series forecasting with artificial neural networks: IHTS. *Neurocomputing, 174, part B*, 974-987.
- Banco de la República. (2018). *Tasa de cambio del peso colombiano (TRM)*. Bogotá.
- Brace, M.C., Schmith, J., & Hadlin, M. (1991). Comparison of The Forecasting Accuracy of Neural Networks with Other Established Techniques. *Proceedings of the First Forum on Application of Neural Networks to Power Systems Seattle*, 31-35.
- Brio, B. M., y Serrano, C. (1995). Fundamentos de las redes neuronales artificiales: Hardware y software. *SCIRE, 1*(1).
- Callen, J.L., Kwan, Yip, C., & Yuan, Y., (1996). Neural network forecasting of quarterly accounting earnings. *International Journal Forecast*, 475-482.
- Casado, D. (2006). *Análisis de series temporales*. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid: Departamento de Estadística.
- Foster, W.R, Collopy, F., & Ungar, L.H. (1992). Neural network forecasting of short, noisy time series. *Comput. Chem. Eng.*, 293-297.
- Gooijera, J. G., & J.Hyndman, R. (2006). 25 years of time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, 22, 443-473.



- Gorr, W.L., Nagin, D., & Szczypula, J. (1994). Comparative study of artificial neural network and statistical models for predicting student grade point averages. *International Journal Forecast*, 17-34.
- Hill, O., & Remus, W. (1996). Neural network models for time series forecasting. *Manag. Sci*, 1082-1092.
- Hu, M.Y., Zhang, P., Jiang, C.X., & Patuwo, B.E. (1999). A cross-validation analysis of neural network out-of-sample performance in exchange rate forecasting. *Decis. Sci*, 197-216.
- López, R. F., & Fernández, J. M. (2008). *Las redes neuronales artificiales*. En L. Bello (Ed.). España: Netbiblo.
- Matich, D. J. (Marzo de 2001). *Redes neuronales: conceptos basicos y aplicaciones*. Bogotá: Cátedra, Universidad Tecnológica Nacional - Departamento de Ingeniería Química.
- Pradeepkumar, D., & Ravi, V. (3 de mayo de 2016). Forecasting financial time series volatility using Particle Swarm Optimization trained Quantile Regression Neural Network. *Applied Soft Computing*, 35-52.
- Seruzier, M. (2003). *Medir la economía de los países según el sistema de cuentas nacionales*. Bogotá: Alfaomega.
- Spyros, Ms. (Diciembre de 1996). Forecasting: Its role and value for planning and strategy. *International Journal of Forecasting*, 513-537.
- Tanco, F. (s.f.). *Introduccion a las redes neuronales artificiales*. Argentina: Universidad Tecnologica Nacional Facultad regional Buenos Aires. Argentina: Grupo de Inteligencia Artificial.
- Tang, Z., & Almeida, C. (1991). Time series forecasting using neural networks vs. box-jenkins methodology. *Simulation*, 303-310.
- Tealab, A., Hefny, H., & Badr, A. (18 de junio de 2017). Forecasting of nonlinear time series using artificial neural network. *Future Computing and Informatics Journal*.
- Teixeira, J. P. & Fernandes P. O. (Diciembre de 2014). Tourism time series forecast with artificial neural networks. *Tékhné*, 26-36.
- Universidad Autonoma de Madrid. (2004). *Curso de predicción económica y empresarial*. Madrid.: UAM.
- Universitat de les Illes Balears. (s.f.). *Definición y causas de autocorrelación*. Islas Baleares: UIB.
- Velásquez, J. D., Zambrano, C., & Franco, C. (15 de Octubre de 2013). *A comparison of exponential smoothing and neural networks in time serires prediction*, (pp. 66-73).
- Zhang, P, & Qi, M. (2005). Neural network forecasting for seasonal and trend time series. *Eur. J. Oper. Res.*, 501-514.
- Zhang, P, & Hu, M.Y. (1998). Forecasting with artificial neural networks: the state of the art. *International Journal Forecast*, 35-62.

Momentos



VIII Congreso Universidad Militar Nueva Granada
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA APLICADA**



III Congreso Escuela de Postgrados FAC
**CONGRESO INTERNACIONAL
DE LOGÍSTICA AERONÁUTICA**



Integración Logística para la industria sostenible





Apertura Congreso





Ponencias





Foro. Integración logística para la industria sostenible y el sector defensa





Entrega de reconocimiento del CR. Neira a Lorena Bearzotti (ponente)



Palabras de cierre del CR. Neira





Participantes y colaboradores

