



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UNA FUERZA LABORAL
POLIFUNCIONAL PARA EL SECTOR
SERVICIOS: CASO APLICADO A LA
INDUSTRIA DEL RETAIL**

CÉSAR AUGUSTO HENAO BOTERO

Tesis para optar al grado de
Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Profesores Supervisores:

JUAN CARLOS MUÑOZ

JUAN CARLOS FERRER

Santiago de Chile, Diciembre 2015

© 2015, César Augusto Henao Botero



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UNA FUERZA LABORAL POLIFUNCIONAL PARA EL SECTOR SERVICIOS: CASO APLICADO A LA INDUSTRIA DEL RETAIL

CÉSAR AUGUSTO HENAO BOTERO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JUAN CARLOS MUÑOZ

JUAN CARLOS FERRER

JORGE VERA

VÍCTOR ALBORNOZ

JOSÉ VERSCHAE

PAULO ROCHA E OLIVEIRA

JORGE VÁSQUEZ

Para completar las exigencias del grado de
Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Diciembre, 2015

A Dios, a mi familia, y en especial a
mi hermano Eliecer

AGRADECIMIENTOS

“El agradecimiento es la memoria del corazón.” –Lao-Tse. Al leer esta frase pude esclarecer lo que mi corazón quiere comunicar. Y es que esta sección no se escribe con la razón, no es algo que deba tomarse a la ligera; es la oportunidad perfecta para expresar ese enorme agradecimiento que se siente por todas esas personas que han hecho parte de un maravilloso viaje. Viaje que no ha sido sencillo, pero sí muy gratificante por todo el esfuerzo realizado. Y si quizás mi memoria olvida algunos nombres, anticipadamente les pido disculpas, en el fondo sabrán que también hacen parte de este sentimiento de gratitud.

Quiero iniciar agradeciendo a Dios, definitivamente siempre lo he sentido cercano a mí. Él me ha llevado a tierras lejanas, pero nunca ha permitido que me aleje del objetivo trazado. Ha cuidado de mi familia durante mi ausencia, y ha ayudado a darme calma y confianza en los momentos sombríos. Quiero que sepa que ha sido un supervisor talentoso, y que este logro es tanto mío como suyo.

A mis padres, Adriana y Jorge, personas sencillas y amorosas, siempre a mi cuidado y el de mis hermanos. Espero que Dios me permita retribuirles todo lo bueno que se merecen, es uno de mis grandes anhelos. A mis hermanos y sobrinos: Diego, Camila, Santiago, Dieguito, y Ariana. Ustedes bien saben lo importantes que son para mí. Esas interminables charlas, llenas de alegría y bromas. Luciana un beso para ti en los cielos. A mi hermano Eliecer, 12 años no son nada, aún sigues vívido en mi mente y corazón. Te extraño mucho, todos te extrañamos, este trabajo va muy especialmente dedicado a ti. Un gran hermano mayor, pero también un parcerero.

Unas inmensas gracias a mis dos excelentes tutores de tesis, JuanCa y Juan Carlos. Ha sido todo un privilegio trabajar en equipo con dos personas tan talentosas, pero sobretodo de tan altas cualidades humanas. Una mención especial a JuanCa, gracias por la confianza depositada en mí, por ser un guía en los momentos difíciles, por ser un supervisor exigente, pero también por tu amistad. Tu apoyo ha sido fundamental desde que esta travesía comenzó años atrás. Reuniones de trabajo muy amenas y productivas, nunca faltaron las bromas y las risas. Gracias por esa agudeza mental, siempre un paso adelante. Tu frase te

inmortalizará: ¿Qué pasa sí? Frase vital durante todo el doctorado, pero en ocasiones también de temer. Espero seguir trabajando con ambos, muchas gracias de nuevo.

A los miembros del Comité de Tesis, quienes ayudaron con sus comentarios y valiosos puntos de vista durante el transcurso de esta investigación. En especial al profesor Jorge Vera, cuya experiencia y buenos comentarios ayudaron a completar uno de los trabajos de esta tesis. También quiero agradecer al profesor David Simchi-Levi por su acogida en Boston. Mi pasantía en *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) fue muy enriquecedora para darle una nueva perspectiva a esta investigación. Nunca olvidaré mi estancia en un lugar tan asombroso y especial.

A Darío Arango, por su apoyo inicial y acercarme a la posibilidad de realizar mi doctorado. A Armin Lüer y Mauricio Varas, amigos y compañeros del doctorado en la PUC, quienes en su momento aportaron opiniones valiosas para enriquecer este trabajo. También quiero agradecer a mis colegas y compañeros de SHIFT, por proporcionar la data utilizada en esta tesis y su oportuna retroalimentación en varias etapas de la investigación.

Al Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) por haberme acogido. Agradecimientos a todos los profesores por sus enseñanzas y los conocimientos brindados. Una mención especial al profesor Juan Enrique Coeymans, quien con su carisma, alegría, y particulares bromas siempre brinda un ambiente cálido y acogedor en el departamento. Una persona muy querida por todo el grupo de estudiantes extranjeros. Me gustaría también agradecer la amabilidad y buena disposición del personal administrativo: Ani, Pía, Carla, Cyndi, Katherine, Ceci, Ignacia, y Juvenal. Excelentes personas todos.

A mis amigos y compañeros de la PUC, maravillosas personas que me encontré en este viaje, un gran tesoro: Lina, Julián, Reinel, Paola, Margareth, Ana Batista, Cristóbal, Daniel Jaén, Jaime, Carlos, Fausto, Omar, Daniel, Felipe Ortiz, Ana Sofía, Yerly, Luis, Guillermo, Felipe González, Rafael Delpiano, Felipe Delgado, y Paula. Es difícil realizar una mención especial, pues de hacerlo tendría que hacer una nota para la mayoría de estos grandes amigos. Con muchos de ellos compartí la costumbre de almorzar en el horario colombiano.

Geniales y reparadoras charlas de medio día, eficaces para crear un día ameno y productivo. También me gustaría agradecer a Anson, Sebastián, Andrés, Eduardo, Satish, y Adrián durante mi estadía en Boston. Su hospitalidad y amistad llenaron mi estancia de buenos momentos y recuerdos. Fue una inolvidable experiencia de vida junto a ustedes.

Un agradecimiento especial a los patrocinadores de esta investigación. A Conicyt por ser la principal fuente de financiación de esta investigación, mediante la Beca Doctorado para Estudiantes Extranjeros en Chile. A la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, por la Beca Estudios de Postgrado. Al programa MISTI *Global Seed Funds*, el cuál financió mi estadía en MIT. También me gustaría agradecer el apoyo financiero de varias divisiones administrativas de la PUC: VRI y Dirección de Postgrado.

A mis amigos colombianos en Chile, una segunda familia, hemos compartido innumerables momentos juntos. Un agradecimiento especial para mi tío Luis Botero, has sido siempre un gran apoyo familiar. Un tremendo agradecimiento a Chile y a los chilenos; gracias por acogerme durante todo este tiempo y permitirme cumplir varios de mis sueños.

Me gustaría agradecer de manera muy especial y cariñosa a dos grandes amigos, dos parceros del alma, dos personas que me han acompañado de cerca y de lejos durante todo este viaje. A mi amiga Ana Baena, una mujer excepcional, dedicada, paciente, bondadosa, y sobre todo una notable amiga. Has sido una excelente acompañante de viaje, una copiloto atenta y asertiva, ¡muchísimas gracias de nuevo! A mi gran amigo Jorge Leottau, un hermano para mí, una persona con la que he compartido muchas de las mejores experiencias de mi vida. Eres una persona brillante y noble, los mejores deseos para ti. Dios quiera que podamos volver a trabajar juntos.

Por último, me gustaría agradecer a mi linda novia, Virginia González, indiscutiblemente uno de los grandes tesoros que encontré en Chile. Tu belleza refleja la linda persona que eres en tu interior. Gracias por tu apoyo incondicional, por tu paciencia y comprensión, y en especial... por tu gran amor.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|---|------|
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| ÍNDICE DE TABLAS | ix |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xi |
| ABREVIATURAS | xii |
| RESUMEN..... | xiv |
| ABSTRACT | xvi |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. El sector servicios y la gestión de los recursos humanos | 1 |
| 1.2. Polifuncionalidad en la gestión de los recursos humanos | 4 |
| 1.3. Caracterización del problema..... | 8 |
| 1.3.1. Polifuncionalidad: sector manufactura versus sector servicios..... | 9 |
| 1.3.2. Definición del problema..... | 12 |
| 1.3.3. Dificultades del problema | 13 |
| 1.4. Revisión de literatura en polifuncionalidad | 14 |
| 1.4.1. Polifuncionalidad sin el uso del encadenamiento | 16 |
| 1.4.2. Polifuncionalidad con el uso del encadenamiento | 18 |
| 1.4.3. Principales vacíos en la literatura..... | 20 |
| 1.5. Hipótesis..... | 21 |
| 1.6. Objetivos | 22 |
| 1.7. Contenido y contribuciones de la investigación..... | 23 |
| 1.7.1. Contenido | 23 |
| 1.7.2. Contribuciones | 25 |

| | |
|--|----|
| 2. EL IMPACTO DE LA POLIFUNCIONALIDAD SOBRE LA PROGRAMACIÓN DE PERSONAL EN EL SECTOR SERVICIOS: CASO DE ESTUDIO EN LA INDUSTRIA DE RETAIL..... | 29 |
| 2.1. Introducción | 30 |
| 2.2. Revisión de literatura: Polifuncionalidad en la gestión de los RRHH | 32 |
| 2.3. El problema | 37 |
| 2.4. Formulación del modelo..... | 39 |
| 2.5. Experimentos y resultados | 45 |
| 2.5.1. Escenarios..... | 48 |
| 2.5.2. Resultados y discusión | 50 |
| 2.6. Conclusiones y futura investigación | 57 |
| 3. POLIFUNCIONALIDAD CON CADENAS CERRADAS EN EL SECTOR SERVICIOS: UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN ROBUSTA..... | 60 |
| 3.1. Introducción | 61 |
| 3.2. Caracterización del problema..... | 66 |
| 3.2.1. Modelación de la polifuncionalidad..... | 67 |
| 3.2.2. Definición del problema..... | 68 |
| 3.3. Formulación del modelo..... | 70 |
| 3.3.1. Modelo de optimización..... | 70 |
| 3.3.2. Heurística constructiva..... | 73 |
| 3.4. Optimización robusta | 75 |
| 3.4.1. Enfoque de optimización robusta..... | 76 |
| 3.4.2. Reformulación robusta | 79 |
| 3.5. Resultados y discusión | 84 |
| 3.5.1. Escenarios..... | 86 |
| 3.5.2. ¿Cuánta polifuncionalidad agregar?..... | 89 |
| 3.5.3. ¿Cómo agregar la polifuncionalidad? | 91 |
| 3.5.4. Análisis de desempeño | 92 |
| 3.6. Conclusiones y futura investigación | 97 |

| | |
|---|-----|
| 4. MODELACIÓN DE LOS BENEFICIOS DE LA POLIFUNCIONALIDAD CON CADENAS CERRADAS EN SISTEMAS DESBALANCEADOS..... | 100 |
| 4.1. Introducción | 101 |
| 4.2. Revisión de literatura | 104 |
| 4.3. El problema | 109 |
| 4.4. Metodología | 110 |
| 4.4.1. Etapa 1: Expresión analítica para el uso de la polifuncionalidad..... | 111 |
| 4.4.2. Etapa 2: Generación del conjunto atractivo de cadenas cerradas..... | 118 |
| 4.4.3. Etapa 3: Evaluación del desempeño y selección de las mejores estructuras de polifuncionalidad | 122 |
| 4.5. Resultados y discusión | 126 |
| 4.5.1. ¿Dónde y cuánta polifuncionalidad agregar? | 128 |
| 4.5.2. ¿Cómo agregar la polifuncionalidad? | 130 |
| 4.6. Conclusiones y futura investigación | 139 |
| 4.7. Apéndice A: Probabilidad de subdotación por departamento cuando $\bar{n} > 0$ | 141 |
| 4.8. Apéndice B. Expresión analítica para el valor óptimo continuo de la polifuncionalidad (\bar{n}^*) por departamento: caso distribución normal | 142 |
| 5. CONCLUSIONES | 145 |
| 5.1. Resumen de resultados | 145 |
| 5.2. Políticas de polifuncionalidad | 149 |
| 5.3. Futura investigación | 151 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 154 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1-1: Ventajas y desventajas de tener personal polifuncional en una organización | 5 |
| Tabla 1-2: Clasificación de los modelos de programación de personal según su grado de sofisticación..... | 10 |
| Tabla 1-3: Estudios previos sobre polifuncionalidad en la gestión de los RRHH | 15 |
| Tabla 2-1: Características de estudios sobre polifuncionalidad en la gestión de los RRHH | 35 |
| Tabla 2-2: Cantidad de alternativas de turnos de trabajo por día y por semana para cada tipo de contrato..... | 47 |
| Tabla 2-3: Ejemplo de alternativas específicas de turnos por día de trabajo y secuencias de días de trabajo para dos estructuras de turnos | 47 |
| Tabla 2-4: Características de los escenarios..... | 50 |
| Tabla 2-5: Métricas de desempeño: Polifuncionalidad <i>versus</i> Personal especializado | 51 |
| Tabla 2-6: Métricas de polifuncionalidad | 54 |
| Tabla 2-7: Porcentaje de polifuncionalidad por tipo de contrato | 55 |
| Tabla 2-8: Características de la solución para cada escenario | 56 |
| Tabla 3-1: Cantidad óptima de empleados polifuncionales de la tienda para cada instancia | 90 |
| Tabla 3-2: Cantidad óptima de empleados polifuncionales por departamento para cada nivel de variabilidad de la demanda en el peor caso | 90 |
| Tabla 3-3: Ejemplo de cadenas construidas con enfoque heurístico, para $\Gamma = 1$ y $\alpha = 20\%$ | 91 |
| Tabla 3-4: Métricas de desempeño para diferentes niveles de variabilidad y conservatismo | 94 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 4-1: Características de estudios previos sobre polifuncionalidad con uso de cadenas | 104 |
| Tabla 4-2: Cantidad óptima de empleados polifuncionales (\bar{m}^*) según el costo de capacitación: (a) $c^c = 1$; (b) $c^c = 30$; (c) $c^c = 50$; y (d) $c^c = 200$ | 130 |
| Tabla 4-3: Cantidad óptima de empleados polifuncionales (\bar{m}^*) requerida en la tienda, según el costo de capacitación: (a) $c^c = 1$ y (b) $c^c = 30$ | 132 |
| Tabla 4-4: Ejemplo de cadenas construidas bajo el enfoque heurístico con $c^c = 1$ y $\%CV = 30\%$ | 133 |
| Tabla 4-5: Ejemplo de cadenas construidas bajo el enfoque miope | 134 |
| Tabla 4-6: Métricas de desempeño para $c^c = 1$ | 135 |
| Tabla 4-7: Métricas de desempeño para $c^c = 30$ | 137 |
| | |
| Tabla 5-1: Políticas para diseñar una fuerza laboral polifuncional en el sector servicios | 149 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1-1: Comparación de estructuras de polifuncionalidad en un sistema balanceado: (a) CLC y (b) CCC | 6 |
| Figura 1-2: Sistemas especializados en el sector servicios y manufactura: desbalanceado vs. balanceado | 7 |
| | |
| Figura 3-1: Comparación de estructuras de polifuncionalidad: (a) CLC; (b) CCC; (c) CA 63 | |
| Figura 3-2: Costo total promedio semanal para diferentes niveles de variabilidad y conservatismo | 93 |
| Figura 3-3: Ahorro porcentual en el costo promedio de sub/sobredotación semanal para diferentes niveles de variabilidad y conservatismo | 95 |
| Figura 3-4: Desempeño y niveles de polifuncionalidad alcanzados con la heurística A-CLC para cada nivel de variabilidad, cuando $\Gamma = 1$ | 96 |
| | |
| Figura 4-1: Comparación de estructuras de polifuncionalidad: (a) CLC; (b) CCC; (c) CA; (d) CR; (e) TxU; (f) UxT; (g) FB; y (h) R | 107 |
| Figura 4-2: Comparación de estructuras de polifuncionalidad en el enfoque miope: (a) CP; (b) 1CL; (c) 2CL; (d) 3CL; y (e) PT | 122 |
| Figura 4-3: Desempeño y niveles de polifuncionalidad alcanzados con la estructura A-CLC para cada %CV de la demanda. Caso $c^c = 1$ | 139 |

ABREVIATURAS

| | |
|---------|--|
| RRHH | Recursos Humanos |
| ND-RRHH | Nivel de Decisión en la gestión de los Recursos Humanos |
| D | Dotación de personal |
| PST | Programación Semanal de Turnos |
| ADD | Asignación de Días de Descanso |
| AT | Asignación de Turnos |
| A | Asignación de personal |
| ID | Incertidumbre en la Demanda |
| IO | Incertidumbre en la Oferta |
| FT45 | Empleados <i>Full-Time</i> que trabajan 45 horas semanales |
| PT30 | Empleados <i>Part-Time</i> que trabajan 30 horas semanales |
| PT20 | Empleados <i>Part-Time</i> que trabajan 20 horas semanales |
| MF | Multifuncionalidad |
| E | Encadenamiento |
| CP | Cero Polifuncionalidad |
| PT | Polifuncionalidad Total |
| CLC | Cadena Larga Cerrada |
| CCC | Cadena Corta Cerrada |
| CA | Cadena Abierta |
| CR | Cadena Recíproca |
| 1CL | Una Cadena Larga Cerrada |

| | |
|-------|--|
| 2CL | Doble Cadena Larga Cerrada |
| 3CL | Triple Cadena Larga Cerrada |
| NDS | Nivel de Servicio |
| %EP | Porcentaje de Empleados Polifuncionales |
| %PT | Porcentaje de Polifuncionalidad Total |
| %AS | Ahorro porcentual en la Subdotación |
| %SSA | Ahorro porcentual en la Sub/Sobredotación |
| FO | Función Objetivo |
| MPL | Modelo de Programación Lineal |
| MPEM | Modelo de Programación Lineal Entera Mixta |
| OR | Optimización Robusta |
| A-CLC | Algoritmo de Cadenas Largas Cerradas |
| A-CR | Algoritmo de Cadenas Recíprocas |

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UNA FUERZA LABORAL POLIFUNCIONAL PARA EL SECTOR
SERVICIOS: CASO APLICADO A LA INDUSTRIA DEL RETAIL

Tesis enviada a la Dirección de Postgrado en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería.

CÉSAR AUGUSTO HENAO BOTERO

RESUMEN

La gestión de los recursos humanos en el sector servicios, y en particular en la industria del retail, enfrenta fenómenos predecibles como la estacionalidad de la demanda, y no predecibles como su variabilidad y el ausentismo no programado de personal. En tal contexto, incluso empresas con sofisticados sistemas de planificación de turnos, enfrentan problemas de subdotación y sobredotación de personal que pueden provocar aumentos en los costos laborales y un deterioro en el nivel de servicio a clientes. Un factor agravante es que las empresas del sector servicios usualmente consideran empleados capacitados para trabajar en una única actividad, lo cual resta flexibilidad a las posibilidades de asignación.

Esta tesis busca evaluar los potenciales beneficios de incorporar flexibilidad laboral en la gestión de los recursos humanos, a partir del uso de personal polifuncional que pueda ser entrenado para trabajar en distintas actividades. El principal objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología que permita diseñar una fuerza laboral polifuncional costo-efectiva a nivel estratégico, y entregar políticas de polifuncionalidad eficientes y atractivas de implementar en las empresas del sector servicios.

Las hipótesis de trabajo se validaron a través de tres artículos científicos. En un primer artículo, se propuso una estrategia híbrida de flexibilidad laboral, la cual considera el uso de personal polifuncional, pero también considera estrategias tradicionales como el uso de contratos flexibles y el uso de un sistema de programación de turnos para aprovechar esta

flexibilidad. El corazón del enfoque fue un modelo de programación lineal entera mixta. Los resultados muestran que es preferible tener empleados polifuncionales cuyos contratos sean altamente flexibles y ofrezcan una buena cantidad de horas laborales semanalmente.

El segundo y tercer artículo sólo usan personal polifuncional como estrategia de flexibilidad. A diferencia del primer artículo, estos dos trabajos no estudian el impacto negativo de la estacionalidad de la demanda. Sin embargo, sí consideran distintos niveles de su variabilidad e incorporan el uso de cadenas cerradas para evaluar los beneficios de la polifuncionalidad en sistemas desbalanceados. Ambos artículos presentan diferencias metodológicas, pero sus resultados son consistentes entre sí.

El segundo artículo presenta una solución simultánea para determinar la cantidad óptima de empleados polifuncionales por actividad. El enfoque consiste en un modelo de programación lineal entera mixta y el uso de la metodología de optimización robusta.

Por otra parte, el tercer artículo propone una modelación continua de la fuerza laboral y un análisis local y separado por actividad, y de manera novedosa entrega una expresión analítica para estimar la cantidad óptima de empleados polifuncionales por actividad.

Los resultados obtenidos en los tres artículos proveen un conjunto de lineamientos y políticas para responder las tres preguntas fundamentales sobre polifuncionalidad: dónde agregarla, cuánta agregar, y cómo debería agregarse.

Palabras claves: flexibilidad laboral, polifuncionalidad, encadenamiento, programación de personal, sistemas desbalanceados, sector servicios, retail, optimización robusta.

Miembros de la Comisión de Tesis Doctoral

JUAN CARLOS MUÑOZ
JUAN CARLOS FERRER
JORGE VERA
VÍCTOR ALBORNOZ
JOSÉ VERSCHAE
PAULO ROCHA E OLIVEIRA
JORGE VÁSQUEZ

Santiago de Chile, Diciembre, 2015

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

PLANNING A MULTI-SKILLED WORKFORCE IN THE SERVICE SECTOR: A
RETAIL INDUSTRY CASE

Thesis submitted to the Office Graduate Studies in partial fulfillment of the requirements
for the Degree of Doctor in Engineering Sciences by

CÉSAR AUGUSTO HENAO BOTERO

ABSTRACT

Human resources management in the services sector, and in particular in the retail industry, must deal with predictable phenomena like demand seasonality as well as unpredictable ones such as demand variability and absenteeism. In this context, even firms with a good shift assignment system may encounter problems of overstaffing and understaffing. Inadequate handling of these problems can thus result in increased labor costs and deterioration of customer service levels. An aggravating factor is that firms in the service sector usually use trained employees to work in a single activity, which reduces flexibility in allocation possibilities.

This thesis seeks to evaluate the potential benefits of incorporating workforce flexibility in the form of multiskilling into human resources management. Under multiskilling, personnel with appropriate training can be assigned to work in different activities. The main objective of this research is to develop a methodology to design a cost-effective multiskilled workforce at the strategic level and identify efficient and attractive multiskilling policies suitable for practical implementation by service sector firms.

The working hypotheses of this thesis were validated in three scientific articles. The first article proposes a hybrid strategy of labor flexibility using multiskilled personnel but also traditional workforce strategies such as flexible contracts and sophisticated personnel scheduling systems to exploit this flexibility. The heart of the approach is a mixed integer

linear programming model. The results show that multiskilling is best applied to employees whose contracts are highly flexible and stipulate a considerable number of weekly working hours.

The second and third articles use only multiskilled personnel as a flexibility strategy. Unlike the first article, these two works do not analyze the negative impact of demand seasonality. However, they do consider a range of scenarios with varying levels of personnel demand and employ closed chains to evaluate the benefits of chained multiskilling in unbalanced systems. Although the two articles have methodological differences, their results are consistent with each other.

The second article presents a simultaneous solution to determine the optimal number of multiskilled employees per activity. The solution approach consists of a mixed integer linear programming model and incorporates the robust optimization methodology.

The third article, on the other hand, proposes a continuous modeling of the workforce and a local and separate analysis of each activity, delivering a novel analytic expression for approximating the optimal number of multiskilled employees for each one.

The results obtained from the three articles provide a set of guidelines and policies to address the three fundamental multiskilling questions: where to add multiskilling, how much to add and how it should be added.

Keywords: workforce flexibility, multi-skilling, chaining, personnel scheduling, service sector, retail, unbalanced systems, robust optimization.

Members of the Doctoral Thesis Committee:

JUAN CARLOS MUÑOZ
JUAN CARLOS FERRER
JORGE VERA
VÍCTOR ALBORNOZ
JOSÉ VERSCHAE
PAULO ROCHA E OLIVEIRA
JORGE VÁSQUEZ

Santiago de Chile, December, 2015

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El sector servicios y la gestión de los recursos humanos

El sector servicios se distingue entre los demás sectores de la economía por su dinamismo, su rápido crecimiento, y el uso intensivo de Recursos Humanos (RRHH). Este sector incluye industrias tales como el retail, salud, transporte, y centros de llamadas. En el sector servicios los RRHH son normalmente el recurso productivo más costoso. Por este motivo, una gestión eficiente de los RRHH permite a las empresas alcanzar ventajas competitivas y asegurar su permanencia en el mercado (Stewart et al., 1994; Johannessen et al., 1997; Kabak et al., 2008). Las empresas del sector servicios buscan minimizar la dotación de personal encargada de servir a los clientes. Sin embargo, la intensa competencia también les exige proveer un alto Nivel de Servicio (NDS) para incrementar las ventas y mantener la fidelización de los clientes (Chapados et al., 2011). Algunos indicadores del NDS son los siguientes: personas en cola, tiempo en cola, tiempo de atención, y porcentaje de cobertura de la demanda. En resumen, una gestión eficiente de los RRHH debe apuntar a disminuir los costos laborales y a su vez mantener (e incluso aumentar) el NDS entregado a los clientes.

La gestión de los RRHH para el sector servicios es caracterizada en un proceso jerárquico de tres niveles (Abernathy et al., 1973). Este proceso involucra un conjunto de decisiones interrelacionadas sobre diferentes horizontes de planificación. Las decisiones tomadas en un nivel inferior son restringidas por las decisiones tomadas en niveles superiores. Los tres niveles jerárquicos son planificación, programación, y asignación. A continuación se hace una descripción de los tres niveles citados:

1. *Planificación*: En este nivel se toman decisiones del tipo estratégico para un horizonte de planificación típicamente de temporada (e.g., verano, invierno). Involucra dos tipos de decisiones. (a) *Dotación de personal (D)*: determinar los requerimientos de personal por actividad y tipo de contrato (i.e., *full-time* y/o *part-time*). (b) *Capacitación*: determinar la configuración de habilidades que deberán tener los

empleados en cada actividad. Como ejemplo, un problema de planificación para una empresa del sector servicios consiste en decidir, de acuerdo a un NDS pre-establecido, cuántos empleados serán contratados para cada actividad, cuántos de ellos serán *full time* y/o *part time*, y cuáles de ellos serán polifuncionales (i.e., empleados que tienen la habilidad para ejecutar más de una actividad) o especializados (i.e., empleados que están entrenados para ejecutar sólo una actividad). Se debe definir además en qué actividades adicionales serán capacitados los empleados polifuncionales.

2. *Programación*: Se focaliza en decisiones del tipo táctico-operacional. Involucra tres tipos de decisiones. (a) *Asignación de turnos* (AT): asignar los empleados a turnos de trabajo diarios. (b) *Asignación de días de descanso* (ADD): asignar a los empleados días de descanso entre días de trabajo sobre un horizonte de planificación dado (típicamente una semana). (c) *Programación semanal de turnos* (PST): los días de descanso y los turnos de trabajo son asignados simultáneamente. A modo de ejemplo, una vez que se conocen los niveles de dotación y polifuncionalidad disponibles, el problema de programación busca responder para cada empleado qué actividad realizará cada día en el horizonte de planificación, y con cuál turno de trabajo.
3. *Asignación*: Se focaliza en decisiones operacionales en el día a día, y puede verse como un subconjunto de decisiones del nivel de programación. La típica decisión en este nivel es asignar a los empleados a actividades específicas en determinados momentos del día. Las decisiones de asignación se ven limitadas por las decisiones de planificación y de programación. Finalmente, tanto a nivel de programación como de asignación se puede aplicar gestión de los RRHH ante contingencias. El objetivo es responder en tiempo real y con eficacia ante requerimientos atribuibles a variaciones observadas en la demanda y al ausentismo no programado del personal (Gans et al., 2003 y MacVicar et al., 2015).

Independiente del nivel jerárquico estudiado en el proceso de gestión de los RRHH, el sector servicios, y en particular la industria de retail, enfrentan fenómenos predecibles como la estacionalidad de la demanda, y no predecibles como su variabilidad y el

ausentismo no programado de personal. Cuevas et al. (2015) señalan que la demanda por servicios no sólo varía mes a mes, también varía altamente día a día (e.g., días de semana y fin de semana), y también puede haber extremas fluctuaciones durante el día (e.g., periodos punta y valle). Este fenómeno cuando sigue un patrón definido (i.e., predecible) se le conoce como estacionalidad de la demanda y genera diferentes (y variables) requerimientos de personal. Por otra parte, aun cuando la demanda se ciña a una marcada estacionalidad, esta cuenta con cierto nivel de variabilidad ocasionado por las decisiones individuales de los clientes. Adicionalmente, dado que las empresas del sector servicios se enfrentan a un entorno caracterizado por una intensa competencia, la presencia de promociones puede ocasionar variaciones importantes en la demanda, tanto para la propia empresa como para sus competidores. Así, la estimación de la demanda suele estar afectada por incertidumbres importantes que dificultan la precisión de los pronósticos. En cuanto al ausentismo laboral, Inman et al. (2004) lo clasifica de la siguiente forma: (1) ausentismo programado (i.e., predecible), el cual hace referencia a la ausencia convenida de antemano entre el empleado y su empleador (e.g., vacaciones, licencia médica) y por lo tanto no debería causar mayores problemas porque la empresa puede programar los reemplazos; y (2) ausentismo no programado (i.e., no predecible), el cual hace referencia a una ausencia inesperada del empleado en su turno de trabajo (e.g., enfermedad, baja motivación laboral) y por lo tanto aumenta el grado de incertidumbre en la gestión de los RRHH. De esta forma, la estacionalidad de la demanda y su variabilidad, así como el ausentismo no programado de personal complican la gestión eficiente de los RRHH, ya que dificultan el calce entre la oferta y la demanda en todo momento.

Como resultado de estos fenómenos tanto predecibles como no predecibles, incluso empresas de retail con un buen sistema de asignación de turnos, podrían enfrentar problemas de sobredotación y subdotación del personal en distintos momentos de la semana. La sobredotación se refiere a momentos en que la presencia de personal es mayor a la dotación requerida para cumplir con un NDS a los clientes. En este caso el NDS podría mejorar más allá de lo considerado óptimo dado el costo laboral asociado. Por otra parte, la subdotación se refiere a periodos de tiempo donde la demanda por personal es mayor al

nivel de dotación, lo que produce que el NDS desmejore. De hecho, para aquellas actividades donde el NDS está asociado a la cola de clientes, el deterioro del NDS se propagará en los periodos siguientes. En este contexto, dado que las empresas deben reducir este efecto negativo sobre el NDS, comúnmente asignan horas extras a los empleados o contratan empleados temporales para cubrir el déficit, lo cual conduce finalmente a aumentar los costos laborales. Un inadecuado tratamiento de estos dos problemas provoca pérdidas en los ingresos, impacto sobre la reputación, incremento de los costos laborales, y deterioro del NDS ofrecido a los clientes (Kabak et al., 2008 y Simchi-Levi y Wei, 2012).

1.2. Polifuncionalidad en la gestión de los recursos humanos

La gestión de los RRHH observada en distintas empresas del sector servicios es usualmente rígida al considerar el uso exclusivo de personal especializado. Para el sector servicios, Batta et al. (2007) observaron que es ineficiente asignar personal especializado a cada actividad para satisfacer el periodo de mayor demanda, porque esto conduce a aumentar el personal inactivo durante los periodos de baja demanda. Por esta razón, varios estudios en diferentes sectores de la economía han mostrado el potencial que tiene el personal polifuncional como herramienta de flexibilidad laboral, pues permite conseguir un mejor calce entre la demanda y la oferta de empleados (Felan et al., 1993, Molleman y Slomp, 1999; Hopp et al., 2004; y Simchi-Levi, 2010). El personal polifuncional no sólo puede ser usado para proveer flexibilidad que permita un mejor ajuste a la estacionalidad de la demanda, sino también, como una medida de contingencia para mitigar los efectos negativos del ausentismo no programado y la incertidumbre de la demanda (Easton, 2011 y MacVicar et al., 2015). Sin embargo, la polifuncionalidad no es gratis, y entrenar o contratar trabajadores polifuncionales es costoso, más aún en esquemas con total polifuncionalidad. Esto es, donde cada empleado está entrenado para trabajar en cualquier actividad. La Tabla 1-1 muestra un paralelo de las ventajas y desventajas reportadas en distintos trabajos por el uso de personal polifuncional. En resumen, se requiere un sistema de gestión de los RRHH más flexible (i.e., considere personal polifuncional), que permita

una operación costo-efectiva, y una adecuada mitigación de los efectos de la sobredotación y subdotación de personal.

Tabla 1-1: Ventajas y desventajas de tener personal polifuncional en una organización

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| Amortigua la variabilidad y ajusta el descalce entre la oferta y la demanda (Hopp et al. 2004; Simchi-Levi, 2010). | Empleados prefieren ser especialistas porque se sienten indispensables (Clark, 1993). |
| Incrementa las ventas esperadas y la utilización de la oferta (Jordan y Graves, 1995). | Costos de re-entrenamiento debido a la pérdida de experticia al adquirir más habilidades (Yang, 2007) |
| Lidia mejor con el ausentismo y la variabilidad de la demanda (Molleman y Slomp, 1999). | Sobrecarga y estrés en los empleados polifuncionales (Aksin et al., 2007). |
| Mejora el sentimiento de justicia y equidad laboral (Austin, 1977). | Puede inhibir la motivación de los empleados (Fazakerley, 1976). |
| Enriquece el trabajo y el conocimiento del empleado, mejora la productividad de la fuerza laboral como conjunto, y mejora el NDS ofrecido al cliente (Aksin et al., 2007). | Pérdida de productividad en el trabajo por aumento de cambios continuos en las asignaciones y costos de transferencias (Kher y Malhotra, 1994). |
| Disminuye el tiempo de ocio y costos laborales por la disminución del uso de horas extras. Es una alternativa más barata frente a trabajadores <i>part-time</i> (Cuevas et al., 2015). | Puede generar fenómeno de holgazanería social (Wilke y Meertens, 1994). |
| | Polifuncionalidad total es innecesaria, impráctica, y costosa. |

Muchos estudios en diferentes sectores de la economía han coincidido en concluir que los empleados polifuncionales con dos habilidades aparecen como la fuerza laboral más costo-efectiva (e.g., Felan et al., 1993; Brusco y Johns, 1998; Campbell, 1999; Yang, 2007; Kim y Nembhard, 2010; Simchi-Levi, 2010). Este tipo de política de flexibilidad parcial es conocida como flexibilidad grado 2. Apoyados en esta política, varios investigadores han estudiado una estrategia de polifuncionalidad conocida como encadenamiento (e.g., Jordan y Graves, 1995; Hopp et al., 2004; Simchi-Levi y Wei, 2012). Esta estrategia es la más citada y recomendada en la literatura para implementar la polifuncionalidad. El concepto

fue introducido por Jordan y Graves (1995) en un estudio sobre la producción de automóviles en múltiples plantas, tal que cada planta tenía la capacidad de producir dos automóviles diferentes. El concepto de encadenamiento adaptado a la gestión de los RRHH, propone que algunos empleados serán entrenados para trabajar en una segunda actividad, tal que las decisiones de asignación entre empleados y actividades dispuestas en un grafo bipartito forman cadenas. La intuición detrás del concepto de encadenamiento, es que ante escenarios de incertidumbre en la demanda y/o la oferta, las cadenas proporcionan máxima flexibilidad para adaptar la asignación de empleados a los requerimientos de personal. De hecho, Simchi-Levi y Wei (2012) muestran analíticamente para un sistema balanceado en la industria de manufactura (i.e., donde el número de nodos de oferta (plantas) es igual al número de nodos de demanda (productos)) y con demandas estocásticas e independientes, que una Cadena Larga Cerrada (CLC) que conecte todos los nodos de oferta y demanda del sistema, es el diseño de polifuncionalidad óptimo entre todas las configuraciones con flexibilidad grado 2. También muestran que varias Cadenas Cortas Cerradas (CCC), donde cada CCC conecta un número sustancial de nodos de oferta y demanda, se desempeñan tan bien como la CLC. Sin pérdida de generalidad, la Figura 1-1 muestra un ejemplo de las estructuras de encadenamiento CLC y CCC en sistemas balanceados. En cada estructura los nodos de oferta están ubicados a la izquierda y los nodos de demanda están ubicados a la derecha. En la figura una línea sólida representa un recurso especializado y una línea punteada un recurso polifuncional.

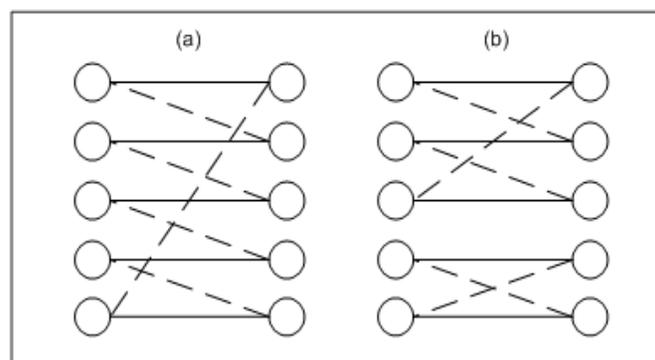


Figura 1-1: Comparación de estructuras de polifuncionalidad en un sistema balanceado:

(a) CLC y (b) CCC

Aunque Simchi-Levi y Wei (2012) focalizan su estudio en sistemas balanceados, también agregan que sus resultados deberían ser extensibles a sistemas desbalanceados. Por otra parte, el problema de asignación de personal en la gestión de los RRHH del sector servicios es inherentemente desbalanceado. Ya que el número de empleados excede significativamente el número de actividades, el desbalance surge. La Figura 1-2 muestra ejemplos de sistemas con asignación de recursos (e.g., empleados, plantas) exclusivamente especializados para el sector servicios y el sector manufactura. Es decir, recursos que sólo están habilitados para desempeñar una única actividad o producir un sólo tipo de producto. En un sistema desbalanceado, hace sentido pensar que una combinación de empleados especializados y polifuncionales sea suficiente para enfrentar las incertidumbres. Además, en lugar de usar una sola CLC, varias cadenas cerradas de diferentes largos podrían aparecer en la solución óptima. En consecuencia, en esta tesis se entiende que para el estudio de sistemas desbalanceados, el análisis y evaluación de los beneficios de la polifuncionalidad a través del uso de cadenas cerradas exige abordar preguntas adicionales.

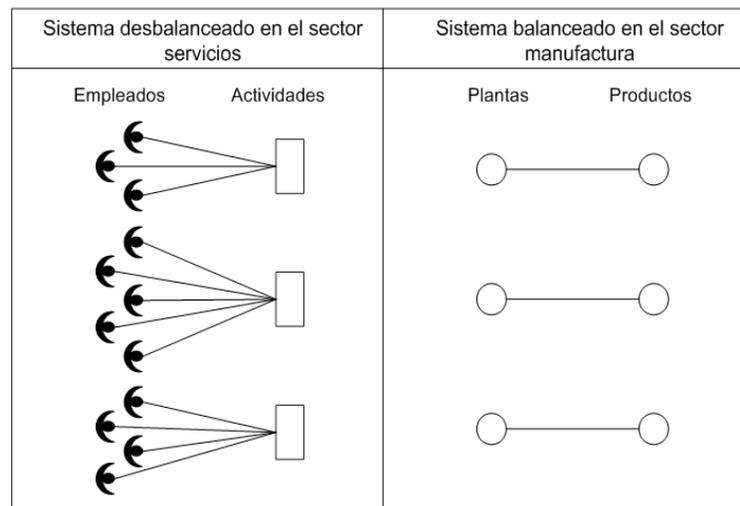


Figura 1-2: Sistemas especializados en el sector servicios y manufactura: desbalanceado vs. balanceado

Finalmente, los esfuerzos para aumentar la flexibilidad en la gestión del RRHH considerando personal polifuncional pueden enfocarse en cualquiera de los tres niveles del

proceso de gestión. Sin embargo, dada la dependencia de los niveles inferiores del proceso de gestión de los RRHH por los niveles superiores, en esta tesis se opta por concentrar las preguntas de investigación en un nivel estratégico. Treleven (1989) y Pennathur et al. (1999) afirman que hasta cuando no sean abordadas detalladamente las preguntas de nivel estratégico, que involucran fuerza laboral polifuncional, no puede haber progreso en el campo de la flexibilidad laboral a otros niveles de decisión. Del mismo modo, Molleman y Slomp (1999) explican que los gerentes de las organizaciones reconocen la necesidad de mayor información sobre los efectos de las políticas de polifuncionalidad. Por lo tanto, el objetivo general de esta tesis es desarrollar una metodología que oriente el diseño de una fuerza laboral polifuncional costo-efectiva a nivel estratégico y también entregar políticas de polifuncionalidad para el sector servicios. En esta tesis se entienden las políticas de polifuncionalidad como un conjunto de reglas o sugerencias respecto de las habilidades polifuncionales que debieran tener los empleados. En lo posible deben responder tres preguntas fundamentales: dónde agregar la polifuncionalidad, cuánta agregar, y cómo debería ser agregada. Sin pérdida de generalidad los desarrollos teóricos y de modelación presentados en esta tesis asumirán el contexto de una tienda de retail donde los empleados podrían ser entrenados para trabajar en más de un departamento (actividad) convirtiéndose en polifuncionales.

1.3. Caracterización del problema

En esta sección se hace un esfuerzo por explicar en detalle las características del problema de investigación abordado en esta tesis. La sección está dividida en tres subsecciones. La Subsección 1.3.1 identifica y explica las principales diferencias entre el problema de polifuncionalidad en el sector manufactura y el problema de polifuncionalidad en el sector servicios. La Subsección 1.3.2 muestra una definición clara y breve del problema. Finalmente, la Subsección 1.3.3 indica cuáles son los principales desafíos y dificultades asociados a la solución del problema.

1.3.1. Polifuncionalidad: sector manufactura versus sector servicios

Los trabajos previos en el estudio de la polifuncionalidad se han concentrado principalmente en el sector manufactura. Sin embargo, las características inherentes al problema de polifuncionalidad en el sector servicios son distintas a las características del problema de polifuncionalidad en el sector manufactura. A continuación se identifican y explican las principales diferencias entre ambos problemas. Se identifican tres diferencias relevantes.

1. *Fuerte estacionalidad de la demanda*: La estacionalidad de la demanda es más fuerte en el sector servicios, y en particular en la industria de retail, que en las industrias del sector manufactura. En el sector servicios, la demanda esperada usualmente varía fuertemente a lo largo de la semana y durante cada hora del día. En este contexto, la flexibilidad laboral es crucial para minimizar el descalce entre la oferta y la demanda. El sector servicios típicamente enfrenta esta fuerte estacionalidad utilizando dos estrategias de flexibilidad complementarias:
 - a. *Sistemas sofisticados de programación de personal*: Cualquier esfuerzo en polifuncionalidad debe ser construido sobre un modelo de programación de personal. La estacionalidad de la demanda enfrentada por empresas del sector servicios es fuerte pero a menudo también es bastante predecible. En este contexto, se usan sofisticados sistemas de programación de personal para asignar las horas de trabajo, mientras simultáneamente se satisface un conjunto de restricciones laborales. Estos sistemas requieren desagregar los requerimientos de la demanda en intervalos cortos (menos de una hora) para describir adecuadamente la estacionalidad de la demanda. En consecuencia, resolver el problema de programación de personal puede ser bastante complicado. La Tabla 1-2 muestra los distintos tipos de modelos de programación de personal de acuerdo a su grado de sofisticación (del grado más alto al más bajo). Para cada modelo de programación de personal la tabla indica el nivel de agregación de la demanda, el horizonte de planificación comúnmente considerado, y las variables de decisión típicamente

modeladas. Una descripción más amplia sobre los modelos de programación de personal puede encontrarse en Alfares (2004), Ernst et al. (2004a), Ernst et al. (2004b), y Van den Bergh et al. (2013).

- b. *Diversidad en turnos de trabajo*: Turnos de trabajo con diferentes largos y contratos laborales que ofrecen distintas cantidades de horas de trabajo a nivel semanal (e.g., *full-time*, *part-time*), son estrategias de flexibilidad tradicionales en el sector servicios. El sector usa ampliamente estas estrategias para dar mayor flexibilidad en la distribución de las horas laborales durante la semana. Esto le permite enfrentar de mejor forma la demanda en los periodos punta y así reducir los niveles de sobredotación y subdotación de personal.

Tabla 1-2: Clasificación de los modelos de programación de personal según su grado de sofisticación

| Modelo de programación de personal | Agregación de la demanda | Horizonte de planificación | Variables de decisión |
|--|---------------------------------|----------------------------|---|
| Programación semanal de turnos (PST) | Actividad, día, periodo del día | Semanas | Asignar días de descanso, asignar turnos de trabajo |
| Asignación de días de descanso y trabajo (ADD) | Actividad, día | Semanas | Asignar días de descanso |
| Asignación de turnos (AT) | Actividad, periodo del día | Día | Asignar turnos de trabajo |
| Asignación de personal (A) | Actividad | Día, Semanas | Asignar horas de trabajo |

2. *Naturaleza de asignación en la oferta*: En la industria de manufactura la oferta (horas de trabajo) es modelada típicamente como una variable continua (e.g., Stewart et al. 1994; Slomp y Molleman, 2002; Bokhorst et al., 2004; Simchi-Levi y Wei, 2012). Sin embargo, en el sector servicios, la asignación de la oferta debe seguir un patrón discreto que refleje los instantes en que las horas de trabajo pueden iniciar y finalizar. Esto implica dos cosas: (1) La asignación de horas de trabajo debería ser

individualizada por empleado y no como un conglomerado de la oferta total por actividad. (2) La asignación de las horas de trabajo por día y por semana de cada empleado está sujeta a las restricciones establecidas por su tipo de contrato laboral. Por lo tanto, existe un conjunto finito y conocido de las jornadas de trabajo a las que un empleado puede ser asignado a trabajar día a día.

3. *Tipo de sistema*: En sistemas de manufactura el número de productos (nodos de demanda) usualmente excede el número de plantas (nodos de oferta), mientras que en las industrias del sector servicios, el número de actividades (nodos de demanda) es significativamente menor que el número de empleados (nodos de oferta). Haciendo una analogía con sistemas de manufactura, empleados corresponden a plantas, y actividades a productos. Adicionalmente, dado que típicamente en el sector servicios la cantidad de horas de trabajo que puede ofertar cada empleado depende de su tipo de contrato, la oferta individual es distinta entre los empleados. Por otro lado, estudios previos sobre polifuncionalidad en industrias del sector manufactura han considerado mayoritariamente sistemas balanceados (e.g. Jordan y Graves, 1995; Hopp et al., 2004; y Simchi-Levi y Wei, 2012). Sin embargo, el problema de asignación de empleados en el sector servicios es inherentemente desbalanceado y así debe ser modelado.

Finalmente, para ambos sectores, una pregunta clave del problema de polifuncionalidad consiste en identificar cuál es el diseño de flexibilidad óptimo para la oferta polifuncional. Muchos autores en ambos sectores han coincidido en concluir que un diseño de polifuncionalidad con flexibilidad grado 2 es suficiente. En el caso de sistemas balanceados, Simchi-Levi y Wei (2012) demostraron que las CLC son preferidas sobre las CCC, ya que las primeras pueden adaptarse mejor a una mayor cantidad de escenarios inciertos de la demanda y/o la oferta. Ellos también demostraron que varias CCC, donde cada CCC conecta un número sustancial de nodos de oferta y demanda, se desempeñan tan bien como una CLC.

Sin embargo, dada la naturaleza desbalanceada del problema de asignación de recursos humanos en el sector servicios, la fuerza laboral podría ser clasificada en dos grupos:

empleados que serán polifuncionales y empleados que serán especializados en una sola actividad. En este contexto, mientras los empleados especializados son recursos dedicados a una única actividad, los empleados polifuncionales son recursos entrenados en una segunda actividad, que bajo la aplicación del concepto de encadenamiento permitirían vincular grupos de actividades o incluso todas las actividades del sistema a estructuras de asignación tipo cadenas cerradas. En otras palabras, para sistemas desbalanceados surgen dos preguntas: (1) ¿Cuántos empleados en cada actividad del sistema serán polifuncionales? y (2) ¿Cuántas cadenas cerradas se requerirán y qué tipos de largos de cadenas cerradas (CLC, CCC) aparecerán en la solución óptima?

1.3.2. Definición del problema

El problema más general que aborda esta tesis es un problema de programación de personal para el sector servicios en el cual cada empleado inicialmente sólo cuenta con una función especialista, un contrato que define el número de horas de trabajo por día y semana que debe trabajar, y otras restricciones laborales. El problema general con polifuncionalidad consiste en identificar cuál será la asignación de trabajo de cada empleado en un horizonte de planificación semanal y diseñar un plan de capacitación que determine cuáles empleados deben ser entrenados, en qué habilidades, y bajo qué tipo de estructuras de polifuncionalidad. Las preguntas fundamentales sobre la polifuncionalidad son: cuánta polifuncionalidad agregar, dónde agregarla, y cómo debería ser agregada. El enfoque de solución propuesto en esta tesis abordará estas tres preguntas de polifuncionalidad de dos formas distintas. Inicialmente se resolverá un problema táctico-estratégico de programación semanal de turnos de trabajo con polifuncionalidad. En este primer trabajo se propone una estrategia híbrida de flexibilidad laboral, la cual considera el uso de personal polifuncional, pero también considera estrategias tradicionales como el uso de contratos flexibles y el uso de un sistema de programación de turnos. Sin embargo, en este primer trabajo no hay presencia de ningún tipo de incertidumbre y tampoco se considera la inclusión del concepto de encadenamiento. Posteriormente, se resolverán dos problemas netamente estratégicos con polifuncionalidad, que consideran incertidumbre en la demanda e incorporan el concepto de encadenamiento. En ambos problemas interesa

comprender mejor cómo el uso de estructuras tipo cadenas cerradas (CLC y/o CCC) pueden ser útiles en sistemas desbalanceados con demanda incierta. Adicionalmente, es de particular interés identificar aquellas estructuras tipo cadenas cerradas que sean robustas ante la variabilidad de la demanda y por lo tanto obtengan el mejor desempeño a nivel costo-efectivo. Los desarrollos teóricos y de modelación presentados en esta tesis asumirán el contexto de una tienda de retail. Sin embargo, estos desarrollos pueden también ser aplicados en múltiples industrias del sector servicios.

1.3.3. Dificultades del problema

El diseño de una fuerza laboral polifuncional a nivel estratégico para las industrias del sector servicios es una tarea difícil. Es decir, resolver el problema de investigación exigirá determinar cuáles departamentos de la tienda requieren personal polifuncional, cuantificar la cantidad de empleados que deberán ser polifuncionales, y el nivel de polifuncionalidad necesario en ellos. Además, entrenar o contratar trabajadores polifuncionales es costoso y por lo tanto resulta atractivo diseñar esquemas eficientes de gestión de la polifuncionalidad que alcancen una gran parte de los beneficios potencialmente alcanzables a un costo reducido (*trade-off*). La presencia de polifuncionalidad hace este problema muy desafiante, pues impide que el problema de programación de personal sea separable por departamentos. Adicionalmente, la polifuncionalidad aumenta la dificultad del problema, ya que al crecer las posibilidades de asignación de los empleados aumenta también la complejidad del problema combinatorial. Cai y Li (2000) explican que el problema de programación de personal es en general muy difícil de resolver, incluso cuando se considera una versión simplificada contando sólo con personal especializado. Ellos explican que el problema es conocido por ser NP-completo y por lo tanto cuando se considera personal polifuncional el problema aumenta en su dificultad. Del mismo modo, Batta et al. (2007) expresan que es muy difícil resolver a optimalidad los problemas que involucran personal polifuncional. Ellos explican que el problema puede ser no tratable computacionalmente para instancias grandes, dada la naturaleza del problema entero y la gran cantidad de variables y restricciones generadas.

1.4. Revisión de literatura en polifuncionalidad

La Tabla 1-3 presenta una revisión de investigaciones previas sobre enfoques y procedimientos usados para la incorporación y evaluación de la polifuncionalidad en la gestión de los RRHH. A continuación se definen los elementos presentes en la Tabla 1-3:

1. *Nivel de Decisión de los RRHH (ND-RRHH)*: Indica qué problema de decisión fue abordado en cada estudio. Se consideran cinco problemas distintos: (a) Dotación de personal (D); (b) Asignación de turnos (AT); (c) Asignación de días de descanso (ADD); (d) Programación semanal de turnos (PST); y (e) Asignación (A).
2. *Multifuncionalidad (MF)*: Indica si en la modelación las distintas habilidades de cada empleado se consideran como un parámetro (Par) o si se considera una variable de decisión que determinará si un empleado será entrenado o no en una particular habilidad o un conjunto de habilidades (Var).
3. *Encadenamiento (E)*: Indica si el estudio evalúa los beneficios de la polifuncionalidad a través de la aplicación del concepto de encadenamiento.
4. *Sistema Balanceado o Desbalanceado (B/D)*: Indica si el sistema modelado es del tipo balanceado (B) o desbalanceado (D).
5. *Incertidumbre en la Demanda (ID)*: Indica si el problema considera variabilidad en la demanda.
6. *Incertidumbre en la Oferta (IO)*: Indica si el problema considera variabilidad en la oferta o ausentismo no programado de personal.
7. *Método*: Indica el método de solución usado. Puede ser: (a) analítico (A); (b) heurísticas (H); (c) simulación (S); u (d) optimización tradicional (OPT).
8. *Aplicación*: Indica la industria o sector donde el modelo fue aplicado.

Tabla 1-3: Estudios previos sobre polifuncionalidad en la gestión de los RRHH

| Referencia | ND-RRHH | MF | E | B/D | ID | IO | Método | Aplicación |
|--------------------------|---------|-----|----|------|----|----|---------|---------------------|
| Felan et al. (1993) | D | Par | No | D | No | No | S | Manufactura |
| Stewart et al. (1994) | A | Var | No | D | No | No | OPT | Manufactura |
| Jordan y Graves (1995) | A | Par | Sí | B, D | Sí | — | S + A | Manufactura |
| Brusco y Johns (1998) | D+AT | Par | Sí | D | No | No | OPT | Servicios |
| Billionnet (1999) | D+ADD | Par | No | D | No | No | OPT | — |
| Campbell (1999) | A | Par | No | D | No | No | OPT+H | Salud |
| Molleman y Slomp (1999) | A | Par | No | D | Sí | Sí | OPT+S | Manufactura |
| Felan y Fry (2001) | A | Par | No | D | No | No | S | Servicios |
| Slomp y Molleman (2002) | A | Par | No | D | Sí | Sí | OPT+H | Manufactura |
| Bokhorst et al. (2004) | A | Var | No | D | No | Sí | OPT+S | Manufactura |
| Hopp et al. (2004) | A | Var | Sí | B, D | Sí | No | S | Manufactura |
| Inman et al. (2004) | D+A | Par | Sí | D | No | Sí | S | Manufactura |
| Jordan et al. (2004) | A | Par | Sí | D | Sí | No | S | Manufactura |
| Iravani et al. (2005) | A | Par | Sí | D | Sí | No | S | Centros de llamadas |
| Slomp et al. (2005) | A | Var | No | D | Sí | Sí | OPT | Manufactura |
| Batta et al. (2007) | D+AT | Par | No | D | No | No | OPT+H | Centros de llamadas |
| Yang (2007) | A | Par | No | D | Sí | Sí | S | Manufactura |
| Brusco (2008) | A | Par | No | D | No | Sí | OPT | Salud |
| Kim y Nembhard (2010) | D+AT | Par | No | D | No | No | OPT | Manufactura |
| Rong (2010) | D+PST | Par | No | D | No | No | OPT | Servicios |
| Easton (2011) | D+PST+A | Var | No | D | Sí | Sí | OPT+S | Servicios |
| Simchi-Levi y Wei (2012) | A | Par | Sí | B | Sí | — | A | Manufactura |
| Deng (2013) | A | Par | Sí | D | Sí | — | OPT+S+A | Manufactura |
| Paul y MacDonald (2014) | D+A | Var | Sí | D | Sí | No | OPT+H+A | Salud |

La extensa literatura sobre polifuncionalidad demuestra un considerable esfuerzo por mejorar su entendimiento y aplicabilidad, tanto para el sector manufactura como para las industrias del sector servicios. El resto de esta sección está dividida en tres subsecciones. En las dos primeras subsecciones se hace una revisión breve de algunos de los estudios listados en la Tabla 1-3. La Subsección 1.4.1 describe los estudios en polifuncionalidad que no abordan la aplicación del concepto de encadenamiento, mientras la Subsección 1.4.2 describe los estudios que sí lo abordan. Finalmente, la Subsección 1.4.3 muestra los principales vacíos identificados a partir de la revisión de literatura realizada.

1.4.1. Polifuncionalidad sin el uso del encadenamiento

Felan et al. (1993) evaluaron mediante simulación el trade-off entre invertir en polifuncionalidad laboral y aumentar los niveles de dotación de personal. Su investigación sugirió que la mejor estrategia de flexibilidad es combinar decisiones de dotación de personal y de polifuncionalidad laboral, considerando dos habilidades por empleado. Stewart et al. (1994) desarrollaron cuatro modelos matemáticos que pueden ser usados para ayudar a los gerentes a decidir planes tácticos óptimos para el entrenamiento/re-entrenamiento de fuerza laboral nueva o ya existente, de acuerdo a los niveles de habilidad exigidos por un programa de producción. Campbell (1999) estudió el problema de asignación de empleados polifuncionales a múltiples departamentos. Sus resultados mostraron que una pequeña cantidad de polifuncionalidad asignada en la forma correcta puede obtener virtualmente los mismos beneficios que una fuerza laboral totalmente polifuncional.

Molleman y Slomp (1999) desarrollaron un modelo de programación por metas para asignar trabajadores polifuncionales a varias tareas o máquinas en un equipo. Su mayor contribución fue ayudar a desarrollar políticas de entrenamiento, pero no dieron sugerencias detalladas. Ellos mostraron que configurar una fuerza laboral donde todos los empleados pueden desempeñar igual número de tareas provee el mejor desempeño (i.e., igual multifuncionalidad). Felan y Fry (2001) fueron los primeros en abandonar el supuesto de igual multifuncionalidad para todos los empleados. A diferencia de Molleman

y Slomp (1999), ellos encontraron mediante simulación que el mejor desempeño se obtiene con una combinación de empleados especialistas y polifuncionales. Ellos consideraron un contexto donde los empleados pueden tener distintos niveles de productividad individual (i.e., mano de obra heterogénea). Yang (2007) comparó mediante simulación un conjunto de políticas de polifuncionalidad representadas por diferentes números de empleados polifuncionales, habilidades adicionales por empleado polifuncional, y máquinas adicionales. Dijo que una o dos habilidades adicionales es suficiente para obtener la mayoría de los beneficios potenciales que la polifuncionalidad puede ofrecer. A diferencia de Felan y Fry (2001), él explicó que es mejor diversificar el entrenamiento sobre más empleados, en lugar de entrenar una combinación de empleados especialistas y polifuncionales, esto sucede cuando se considera ausentismo no programado de personal.

Slomp y Molleman (2002) estudiaron políticas de polifuncionalidad que respondieran a la pregunta de quién debe ser el próximo empleado a ser polifuncional y para cuál tarea. Batta et al. (2007) estudiaron un sistema donde servidores polifuncionales podían procesar múltiples tipos de clientes. Su metodología de solución propuso un modelo de programación matemática y una heurística de generación de columnas. Su modelo se caracteriza por tener una función objetivo que considera los costos de dotación de personal y los costos de transferencia de servidores, dado que se asocia un costo al hecho de que un servidor polifuncional sea transferido de un tipo de cliente a otro. Una diferencia básica con otros modelos fue precisamente considerar los costos y tiempos de transferencia.

Kim y Nembhard (2010) investigaron los efectos de varios factores controlables operacionalmente y exógenos sobre los mínimos niveles de dotación de personal en sistemas de manufactura. La investigación consideró mano de obra heterogénea y el efecto que tiene el proceso de aprendizaje y olvido sobre la productividad de los empleados. En consecuencia, ellos no modelaron la heterogeneidad de la fuerza laboral a partir de una matriz dada de productividad, sino que definieron una expresión para calcular una tasa de productividad por empleado en cada tarea que fue entrenado, la cual dependía de la experiencia del empleado en la ejecución de la tarea. El estudio mostró que restringir el nivel individual de polifuncionalidad a dos tareas exige la contratación de empleados

adicionales. Finalmente, Easton (2011) propuso un modelo de dos etapas que integra decisiones de dotación de personal, polifuncionalidad, programación, y asignación. Su objetivo fue entender las interacciones que hay entre este grupo de decisiones, las cuales pertenecen a distintos niveles de decisión en la gestión de los RRHH. Su modelo es capaz de reasignar empleados disponibles en respuesta a la variación aleatoria en la demanda y al ausentismo no programado de personal.

1.4.2. Polifuncionalidad con el uso del encadenamiento

El estudio de Jordan y Graves (1995) es considerado como el trabajo seminal en la aplicación de la polifuncionalidad a través del uso de cadenas. Ellos estudiaron el problema de producción de automóviles en múltiples plantas. Su estudio consideró un problema de asignación balanceado, donde el número de plantas (i.e., nodos de oferta) es igual al número de productos a fabricar (i.e., nodos de demanda). Mediante un análisis de simulación, ellos mostraron que la CLC entrega casi los mismos beneficios que la polifuncionalidad total. Ellos también dicen que el encadenamiento es especialmente útil en sistemas con presencia de variabilidad en la demanda y/o la oferta. Por otra parte, Brusco y Johns (1998) desarrollaron un modelo de programación lineal entera para decisiones de dotación de personal y asignación de turnos de trabajo. Su estudio consideró mano de obra polifuncional y diferentes niveles de productividad en las habilidades de los empleados. Ellos evaluaron los beneficios de entrenar a los empleados a través del uso de CLC y CCC, las cuales eran un dato de entrada para su modelo de optimización. Sus resultados mostraron que las CLC son las estructuras de polifuncionalidad más útiles para minimizar los niveles de dotación de personal.

Al igual que Jordan y Graves (1995), Simchi-Levi y Wei (2012) también estudiaron el problema de fabricación de productos en múltiples plantas. Simchi-Levi y Wei (2012) dicen que existe muy poca teoría para explicar por qué las CLC funcionan tan bien. Su trabajo se concentró en explicar analíticamente la efectividad de las CLC en sistemas finitos y balanceados, considerando demandas estocásticas e independientes para cada producto. Ellos proporcionaron una justificación teórica a la idea de “cerrar la cadena”, un

concepto que fue observado empíricamente por Jordan y Graves (1995) y Hopp et al. (2004). La propiedad de la súper-modularidad reveló que los arcos flexibles en una CLC se complementan unos a otros. Es decir, a medida que se añaden nuevos arcos flexibles a una cadena cerrada, también aumentan los beneficios esperados, ya que hay mayores oportunidades de transferir capacidad disponible de aquellas plantas con menor demanda esperada a aquellas plantas con mayor demanda esperada. Esto explica el buen funcionamiento de las CLC. Su trabajo también demostró, para sistemas balanceados, que la CLC es óptima entre todas las configuraciones de flexibilidad grado 2.

De igual forma, Deng (2013) también estudió el problema de fabricación de productos en múltiples plantas. Sin embargo, Deng estudió la utilidad del encadenamiento en redes desbalanceados del tipo simétrica y asimétrica. En una red simétrica, todas las plantas tienen la misma capacidad y todos los productos tienen la misma demanda. El objetivo principal de su trabajo fue proporcionar nuevos conocimientos y resultados que explicaran los beneficios del encadenamiento en redes desbalanceadas y asimétricas para el sector manufactura. Sin embargo, su trabajo asume que todas las plantas de la red son flexibles y que toda la capacidad instalada de cada planta puede ser asignada a cada producto. Es decir, no se preocupa por responder las preguntas de dónde y cuánta flexibilidad aplicar. Sus preguntas solo van dirigidas a responder la pregunta de cómo aplicar el encadenamiento en sistemas de manufactura desbalanceados.

En contraposición a los estudios que implementaron el encadenamiento en el sector manufactura, existe un estudio reciente en el sector servicios que modela un sistema desbalanceado e incorpora la polifuncionalidad como una variable de decisión en la modelación. Paul y MacDonald (2014) desarrollan modelos de optimización para evaluar los beneficios de la polifuncionalidad, a través del encadenamiento, sobre un problema de asignación de enfermeras a departamentos bajo demanda estocástica e independiente. Su modelación decide cuál es la cantidad de enfermeras polifuncionales que minimiza el costo total esperado por subdotación, mientras simultáneamente satisfacen requerimientos pre-establecidos de nivel de servicio y calidad en la atención.

1.4.3. Principales vacíos en la literatura

A partir de la revisión de literatura realizada es posible identificar los siguientes vacíos o nichos de investigación donde podría ser interesante profundizar.

Primero, la variable fundamental en un modelo de optimización que busca diseñar una fuerza laboral polifuncional indica si cada empleado será entrenado (o no) para trabajar en cada actividad. Sin embargo, la Tabla 1-3 muestra que existen relativamente pocos modelos de optimización en la gestión de RRHH que incorporan la polifuncionalidad como una variable de decisión, y permitan desarrollar políticas de polifuncionalidad (Stewart et al., 1994; Bokhorst et al., 2004; Hopp et al., 2004; Slomp et al., 2005; Easton, 2011; y Paul y MacDonald, 2014). Bajo un enfoque tradicional, la polifuncionalidad es organizada bajo ciertas estructuras definidas a priori y posteriormente estas estructuras son evaluadas para medir y comparar sus desempeños. La literatura muestra que estas estructuras predefinidas pueden ser asumidas en algunos casos como configuraciones tipo cadena y en otros casos no. Este enfoque tradicional ha sido ampliamente usado en la literatura por otros autores en varios sectores (e.g., Brusco y Johns, 1998; Inman et al., 2004; Iravani et al., 2005, Rong, 2010; Simchi-Levi y Wei, 2012). Sin embargo, este enfoque tradicional podría considerarse miope pues restringe a priori las consideraciones de diseño y limita las posibilidades de encontrar mejores soluciones.

Segundo, la revisión de literatura también mostró que el método más citado y recomendado para aplicar la polifuncionalidad es el encadenamiento. Los principales desarrollos analíticos en encadenamiento fueron los estudios desarrollados por Jordan y Graves (1995) y Simchi-Levi y Wei (2012). Ambos estudios se basan en sistemas balanceados. Posteriormente, Deng (2013) también estudió los beneficios del encadenamiento para el sector manufactura. Este último trabajo estudió sistemas desbalanceados; sin embargo, sólo se preocupó por responder la pregunta de cómo aplicar el encadenamiento. Por otra parte, el problema de asignación de empleados en el sector servicios es inherentemente desbalanceado. En este último caso no solo se debe responder la pregunta de cómo aplicar la polifuncionalidad, sino que también es importante responder

las preguntas de dónde aplicarla y cuánta aplicar. En consecuencia, en sistemas desbalanceados del sector servicios, el análisis y evaluación de los beneficios de la polifuncionalidad a través del uso de cadenas cerradas exige abordar preguntas adicionales.

Finalmente, la Tabla 1-3 también muestra que ninguno de los estudios reportados en la literatura ha implementado la polifuncionalidad en la gestión de los RRHH para la industria del retail. En resumen, la literatura ha dado poca o ninguna consideración sobre: (1) polifuncionalidad en la gestión de RRHH para la industria del retail; (2) modelos con polifuncionalidad como una variable de optimización; y (3) evaluación del encadenamiento en sistemas desbalanceados. Esta tesis aborda el estudio de estos tres aspectos.

1.5. Hipótesis

Es posible diseñar una fuerza laboral polifuncional a nivel estratégico para el sector servicios, tal que los niveles de polifuncionalidad obtenidos minimicen el costo laboral y a su vez satisfagan el nivel exigido de cobertura en la demanda. Adicionalmente es posible desprender políticas de polifuncionalidad generales que puedan guiar las estrategias de gestión de los RRHH en las empresas del sector.

Las hipótesis específicas son las siguientes:

1. Es posible desarrollar un modelo de programación matemática que permita resolver de forma simultánea preguntas de polifuncionalidad y preguntas de programación de personal.
2. La metodología de optimización robusta permite obtener soluciones de polifuncionalidad tipo cadenas cerradas que son robustas ante la variabilidad de la demanda.
3. El problema de polifuncionalidad es originalmente conocido por no ser separable por departamentos. Sin embargo, es posible obtener la cantidad de empleados

polifuncionales por departamento mediante un análisis local y separado de cada departamento del sistema y una modelación continua de la fuerza laboral.

4. Es posible establecer reglas simples de decisión que generen esquemas eficientes de gestión de la polifuncionalidad y puedan ser implementadas a nivel práctico por las empresas del sector servicios.

1.6. Objetivos

Desarrollar una metodología que permita diseñar una fuerza laboral polifuncional costo-efectiva a nivel estratégico y entregar políticas de polifuncionalidad a las empresas del sector servicios que les permitan una operación costo-efectiva a mediano plazo, y una adecuada mitigación de los efectos de la sobredotación y subdotación de personal.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Formular y resolver un modelo de programación matemática que evalúe y mida los beneficios de la polifuncionalidad en la programación semanal de turnos de trabajo.
2. Desarrollar un modelo de optimización que entregue soluciones de polifuncionalidad estructuradas en cadenas cerradas. Estas soluciones deben ser de mínimo costo y también robustas ante la variabilidad de la demanda.
3. Desarrollar una metodología de solución continua para obtener una expresión analítica que estime, bajo demanda estocástica, la cantidad de empleados polifuncionales para cada departamento del sistema.
4. Desprender políticas de polifuncionalidad atractivas y viables para las industrias del sector servicios que obtengan gran parte de los beneficios potencialmente alcanzables a un costo reducido.

1.7. Contenido y contribuciones de la investigación

1.7.1. Contenido

El resto del documento está organizado en cinco capítulos adicionales. Los Capítulos 2, 3, y 4 buscan responder los primeros tres objetivos específicos de la tesis, tal como fue presentado en la Sección 1.6. Cabe destacar que el cuarto objetivo es común para estos tres capítulos. El Capítulo 5 presenta las principales conclusiones de esta tesis y también presenta sugerencias para futura investigación. Es importante notar que los Capítulos 2 al 4 fueron organizados y formateados como artículos individuales y en conjunto contienen los principales resultados de esta investigación. De esta forma, cada capítulo es autónomo y puede ser leído sin la estricta necesidad de leer el resto de los capítulos. Aunque esto facilita la lectura del documento, tiene el inconveniente inevitable de tener que proporcionar algunos contenidos redundantes entre los diferentes capítulos (sobre todo en las secciones de introducción y de definición del problema).

El Capítulo 2 presenta un estudio que modela y evalúa el impacto de incorporar flexibilidad laboral usando polifuncionalidad en la programación semanal de turnos de trabajo en el sector servicios. El estudio no considera ningún tipo de incertidumbre y tampoco incorpora en el análisis estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas. El corazón del enfoque es un Modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MPLEM) que simultáneamente asigna turnos de trabajo dentro de un horizonte de corto plazo (1 semana) y diseña un plan de capacitación asociado para una fuerza laboral conocida y que inicialmente sólo es especializada. La solución se lleva a cabo probando varios escenarios de dotación de personal, mientras se va aumentando paulatinamente el número de actividades (en este caso, departamentos). El objetivo es identificar el impacto de la polifuncionalidad sobre las decisiones de entrenamiento, la composición de los contratos *full-time* y *part-time*, los beneficios sobre el nivel de servicio ofrecido a los clientes en términos de la cobertura total de la demanda, y los ahorros en costos.

El Capítulo 3 presenta un trabajo donde se usa la metodología de optimización robusta para modelar y evaluar los beneficios de las estructuras tipo cadenas cerradas en sistemas desbalanceados con demanda incierta. Esta metodología no requiere conocimiento de las probabilidades asociadas a la realización de la demanda. Inicialmente el problema de asignación de empleados es formulado como MPLEM determinista. El MPLEM decide de manera simultánea cuáles empleados deben ser entrenados, en qué habilidades, y cómo será su asignación de trabajo en un horizonte de planificación de una semana. La característica principal del MPLEM, es que garantiza un plan de capacitación que entrega la cantidad requerida de empleados polifuncionales por actividad, mientras simultáneamente garantiza la formación de un conjunto de cadenas cerradas (CLC y/o CCC) que requiere el mínimo número de entrenamientos. La metodología de solución también se apoya en una heurística constructiva para priorizar la construcción de cadenas cerradas largas a partir de los resultados del MPLEM. Posteriormente, el MPLEM determinista es reformulado como un MPLEM robusto para incorporar explícitamente la incertidumbre de la demanda. El objetivo es obtener soluciones de polifuncionalidad tipo cadenas cerradas que sean robustas, esto es, soluciones que provean un buen desempeño para diferentes escenarios de la variabilidad de la demanda.

El Capítulo 4 presenta una metodología nueva y simple para modelar los beneficios del encadenamiento en sistemas desbalanceados con demanda variable. Esta metodología asume que las demandas por actividad son estocásticas e independientes. También asume que se conoce la función de densidad de probabilidad de la demanda en cada actividad del sistema. La metodología propuesta descompone el problema de polifuncionalidad en tres etapas y lo resuelve de forma secuencial. Las etapas de solución propuestas son las siguientes: (1) Desarrollar una expresión analítica que determine la cantidad óptima aproximada de empleados polifuncionales por actividad y minimice el costo total esperado. (2) Mediante heurísticas constructivas generar un conjunto factible de cadenas cerradas, a partir de la dotación de empleados polifuncionales entregada en la etapa uno. (3) Mediante simulación Montecarlo y un Modelo de Programación Lineal (MPL), evaluar el desempeño de las estructuras tipo cadenas construidas en la etapa dos. El desempeño de la

metodología propuesta es probado ante distintos escenarios de las demandas por actividades, mientras gradualmente se aumenta el costo de capacitación de los empleados. El propósito es identificar aquellas estructuras tipo cadenas cerradas que fueran robustas ante la variabilidad de la demanda y también obtuvieran el mejor desempeño a nivel costo-efectivo.

En cada capítulo la solución del problema emplea información real de una tienda de retail y la formulación propuesta es aplicada a una tienda de Mejoramiento de Hogar en la ciudad de Santiago de Chile.

1.7.2. Contribuciones

A continuación se listan las principales contribuciones de los capítulos propuestos en esta tesis:

1. Capítulo 2

- a. A diferencia de trabajos anteriores, este estudio proporciona una exhaustiva revisión de la literatura (pero también al máximo concisa) sobre los problemas de programación de personal que incorporan y evalúan la polifuncionalidad como fuente de flexibilidad laboral. La revisión es una contribución por sí misma.
- b. Se presenta un modelo capaz de resolver simultáneamente un problema de programación semanal de turnos y diseñar un plan de capacitación para una fuerza laboral conocida. Las contribuciones específicas del modelo son:
 - i. No se tiene conocimiento de ninguna investigación publicada que aborde el problema de programación de turnos con polifuncionalidad para la industria retail. Sin embargo, el modelo también es lo suficientemente flexible para adaptarse a diversas industrias en el sector servicios.

- ii. Incorpora la polifuncionalidad como una variable de decisión dentro de la formulación matemática. Esto permite explorar un dominio más amplio de soluciones en comparación a un plan de entrenamiento exógeno.
 - iii. Cualquier esfuerzo en polifuncionalidad debe ser construido sobre un problema de programación de personal. Este modelo permite que cada empleado sea programado a trabajar en cualquier momento del día y en cualquier agrupación de jornada y secuencia de días de trabajo/descanso permitida bajo su respectivo contrato. Esta característica es bastante novedosa para un problema de programación semanal de turnos con polifuncionalidad. Esta particularidad también permite obtener programas de trabajo más realistas y con máxima flexibilidad, lo cual a su vez implica que el problema será de máxima complejidad.
- c. El estudio presenta un caso de estudio real para la industria retail que ilustra el impacto potencial de la polifuncionalidad sobre la programación de personal. La modelación sería más difícil de entender sin el caso de estudio. Adicionalmente, el caso de estudio hace más interesante el trabajo para gerentes y tomadores de decisión pues entrega políticas de polifuncionalidad prácticas de implementar.

Estas contribuciones fueron publicadas en la siguiente revista:

Henaó CA, Muñoz JC y Ferrer JC (2015). The impact of multi-skilling on personnel scheduling in the service sector: a retail industry case. *Journal of the Operational Research Society*, 66(12), 1949-1959. doi: 10.1057/jors.2015.9.

2. Capítulo 3

- a. Se presenta un modelo capaz de entregar soluciones de polifuncionalidad estructuradas en cadenas cerradas. Las contribuciones específicas del modelo son las siguientes:

- i. El modelo es lo suficientemente genérico para adaptarse a diversas industrias en el sector servicios.
 - ii. La polifuncionalidad es modelada como una variable de decisión dentro de la formulación matemática.
 - iii. A diferencia del resto de trabajos en la literatura sobre polifuncionalidad con uso de cadenas cerradas, las restricciones del modelo propuesto garantizan un plan de capacitación que exige la formación de CLC y/o CCC.
- b. De manera novedosa en la literatura sobre polifuncionalidad se hace uso de la metodología de optimización robusta para modelar y evaluar los beneficios de las estructuras tipo cadenas cerradas. Esta metodología permite identificar un apropiado nivel de conservatismo que alcanza la mayoría de los beneficios potencialmente alcanzables por el uso de la polifuncionalidad total, pero haciendo una inversión en polifuncionalidad que es mucho menor a la exigida por la solución robusta con el nivel de conservatismo máximo (i.e., escenario del peor caso).
 - c. Se entregan políticas de polifuncionalidad que pueden ser implementadas en sistemas desbalanceados. Responde a preguntas clave como: ¿Cuántos empleados serán polifuncionales? y ¿Cuántas cadenas cerradas se requieren y de qué largo?

El artículo que reúne estas contribuciones fue enviado a la siguiente revista:

Henao CA, Ferrer JC, Muñoz JC y Vera JA (2015). Multi-skilling with closed chains in the service sector: a robust optimization approach. Enviado a *International Journal of Production Economics*.

3. Capítulo 4

- a. La principal contribución de este estudio es que entrega una novedosa metodología para resolver el problema de polifuncionalidad de forma separada y secuencial. La

primera etapa de la metodología se centra en entregar una solución de polifuncionalidad aproximada, usando criterios de optimalidad local y asumiendo que las condiciones locales son explicables en toda la región a analizar.

- b. Entrega una ecuación cerrada para obtener la cantidad aproximada de empleados polifuncionales por actividad sin necesidad de realizar análisis muy sofisticados.
- c. Usando reglas de decisión intuitivas este estudio proporciona una heurística que replica el concepto de CLC en sistemas desbalanceados y permite obtener el conjunto de cadenas cerradas con mejor desempeño costo-efectivo.
- d. Se entregan políticas de polifuncionalidad que pueden ser implementadas en sistemas desbalanceados. Lo interesante de estas políticas es que muestran como la inversión en polifuncionalidad depende de la variabilidad de la demanda y de la relación entre los costos de capacitación y subdotación de personal.

El artículo que reúne estas contribuciones fue enviado a la siguiente revista:

Henao CA, Muñoz JC y Ferrer JC (2015). Modeling the benefits of multi-skilling with closed chains in unbalanced systems. Bajo revisión en *Management Science*.

Otros trabajos también se han desarrollado durante esta investigación:

Mac-Vicar M, Ferrer JC, Muñoz JC y Henao CA (2015). Real-time control on personnel scheduling in the retail industry. Bajo revision en *European Journal of Operational Research*.

Cuevas R, Henao CA, Muñoz JC y Ferrer JC. Simultaneous vehicle and crew scheduling problem: solving large real-world instances for public transport lines. *Trabajo en proceso*.

2. EL IMPACTO DE LA POLIFUNCIONALIDAD SOBRE LA PROGRAMACIÓN DE PERSONAL EN EL SECTOR SERVICIOS: CASO DE ESTUDIO EN LA INDUSTRIA DE RETAIL

César A. Henao¹, Juan Carlos Muñoz¹ y Juan Carlos Ferrer²

¹Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile; y ²Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Resumen. La programación eficiente de personal en empresas del sector servicios permite reducir los niveles de sobredotación y subdotación de personal observados en distintos periodos. Sin embargo, normalmente esta programación pierde flexibilidad al considerar el uso exclusivo de personal especializado. Este estudio analiza el impacto de asignar personal polifuncional a distintas actividades y su potencial para mejorar la eficiencia de la programación. Para ello proponemos un modelo de programación lineal entera mixta que determina cuáles empleados deben ser entrenados, en qué habilidades, y cómo será su asignación de trabajo en un horizonte de planificación de una semana. Los resultados del modelo muestran que las configuraciones de polifuncionalidad de mínimo costo se obtienen en los escenarios donde la razón entre la oferta total y la demanda total está en equilibrio. Se concluye que es innecesario e impráctico tener estructuras de dotación de personal con polifuncionalidad total para abordar efectivamente la sobredotación y subdotación de personal. La mitad de los empleados conservarían su rol especialista, mientras la otra mitad debería ser entrenada, en la mayoría de los casos, en una sola habilidad adicional, aun cuando el costo de capacitación se asumió mínimo. También se muestra que es preferible invertir en polifuncionalidad en aquellos empleados cuyos contratos son altamente flexibles.

2.1. Introducción

El sector servicios es reconocido por su rápido crecimiento, ser un sector altamente competitivo, y de uso intensivo de mano de obra. Este sector incluye industrias tales como el retail, salud, transporte, y centros de llamadas. Varios investigadores coinciden en expresar que el recurso más costoso para este tipo de industrias son los Recursos Humanos (RRHH) (Cai y Li, 2000; Alfares 2004). La gestión eficiente de los RRHH permite a las empresas alcanzar ventajas competitivas y asegurar su permanencia en el mercado (Stewart et al., 1994; Johannessen et al., 1997; Kabak et al., 2008). Sin embargo, reducir los costos laborales típicamente implica disminuir los niveles de dotación de personal que se encargan de servir a los clientes, y por lo tanto, también se reduce el Nivel de Servicio (NDS) ofrecido al cliente, un elemento central en la oferta del sector servicios.

El sector servicios, y en particular la industria de retail, enfrentan fenómenos predecibles como la estacionalidad de la demanda, y no predecibles como su incertidumbre y el ausentismo no programado de personal. Estos fenómenos complican la gestión eficiente de los RRHH, ya que calzar la oferta y la demanda llega a ser más difícil. Como resultado, incluso empresas de retail con un buen esquema de asignación de turnos, podrían enfrentar problemas de sobredotación y subdotación del personal en distintos momentos de la semana. La sobredotación se refiere a períodos en que se observa la existencia de personal excesivo (muchas veces ocioso) para cumplir con un determinado NDS a los clientes, mientras que la subdotación se refiere a periodos de tiempo donde los requerimientos de personal exceden el nivel de dotación presente, y en este último caso la situación puede propagarse a periodos sucesivos. Inadecuado tratamiento de estos dos problemas provoca pérdidas en los ingresos, impacto sobre la reputación, incrementos en los costos laborales, y deterioro del NDS ofrecido a los clientes (Kabak et al., 2008; Simchi-Levi y Wei, 2012).

La gestión de los RRHH observada en muchas empresas del sector servicios es usualmente rígida para mitigar los problemas de sobredotación y subdotación de personal. Un factor agravante que reduce las posibilidades de una gestión flexible es que los empleados son especialmente rígidos respecto de las actividades en las que pueden ser

asignados. Para el sector servicios, Batta et al. (2007) observaron que es ineficiente manejar las condiciones fluctuantes del mercado asignando personal especializado (i.e., empleados entrenados en una sola habilidad) a cada actividad para satisfacer el periodo de mayor demanda, porque esto conduce a tener personal inactivo durante los periodos de baja demanda a un alto costo. Por esta razón, varios estudios en diferentes sectores han encontrado que el personal polifuncional tiende a mejorar la flexibilidad, ya que brinda la capacidad de minimizar el descalce entre la demanda y la oferta laboral (Felan et al., 1993, Molleman y Slomp, 1999; Hopp et al., 2004; y Simchi-Levi, 2010). El uso de personal mejor entrenado y calificado contribuye a reducir la sobredotación, e incrementa las ventas por una mejora en el NDS y una mayor fidelización de los clientes. Sin embargo, la polifuncionalidad viene con un costo, especialmente en el caso de la polifuncionalidad total, porque contratar y entrenar empleados en múltiples actividades puede ser muy costoso. Por lo tanto, lo que se requiere es un sistema más flexible de gestión de los RRHH que mitigue los efectos de la sobredotación y subdotación de personal, mientras mantiene una operación costo-efectiva del sistema.

La contribución que pretende hacer este trabajo al problema de programación de personal en el sector servicios, es un modelo que describa y evalúe los impactos y los beneficios de incorporar flexibilidad laboral, a partir del uso de polifuncionalidad dentro del nivel de programación de la gestión de los RRHH. A través de la inversión en polifuncionalidad, personal con el entrenamiento apropiado puede ser asignado a una actividad diferente cada día laboral de la semana. El enfoque de solución propuesto consiste en formular un Modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MPLEM), el cual es resuelto para un caso real de una empresa de retail chilena usando un software comercial. La solución se lleva a cabo probando varios escenarios de dotación de personal, mientras paulatinamente se va aumentando el número de actividades (en este caso, departamentos). Los resultados obtenidos con varias configuraciones de polifuncionalidad y el caso base sin polifuncionalidad (i.e., donde todo el personal es especializado) son comparados y analizados con el objetivo de identificar políticas de polifuncionalidad atractivas y viables de implementar a nivel práctico. Una política de polifuncionalidad

define un conjunto de reglas simples de decisión que determinan los patrones de habilidades que deberían regir a los empleados. En este estudio se intenta responder dos preguntas fundamentales: cuánta polifuncionalidad agregar y cómo debería ser agregada.

El resto del capítulo está dividido en cinco secciones. La sección 2.2 resume la revisión de literatura sobre enfoques y procedimientos que se han utilizado para incorporar la polifuncionalidad en la gestión de los RRHH. La sección 2.3 define el problema a ser estudiado, discute qué características dificultan su solución, y establece los supuestos y fundamentos teóricos considerados para la modelación matemática. La sección 2.4 presenta la formulación del MPLEM para el problema de programación semanal de turnos con polifuncionalidad. La sección 2.5 muestra el enfoque de solución usado, los experimentos realizados y los resultados obtenidos. La sección 2.6 presenta las conclusiones de este trabajo y sugerencias para futuras investigaciones.

2.2. Revisión de literatura: Polifuncionalidad en la gestión de los RRHH

Trabajos previos han desarrollado enfoques y procedimientos para incorporar y evaluar la polifuncionalidad en la gestión de los RRHH. Las columnas dispuestas en la Tabla 2-1 representan un resumen de las principales características de estudios previos reportados en la literatura:

1. *Nivel de decisión de los RRHH (ND-RRHH) estudiado*: La gestión de los recursos humanos puede ser analizada como un proceso jerárquico de tres niveles involucrando un conjunto de decisiones interrelacionadas sobre diferentes horizontes de planificación. Las decisiones tomadas en un nivel inferior son restringidas por las decisiones tomadas en niveles superiores. Los tres niveles jerárquicos son planificación, programación, y asignación. Esta caracterización fue presentada por Abernathy et al. (1973), y ha sido frecuentemente citada en otras publicaciones (Campbell, 1999; Brusco, 2008; Easton, 2011). ND-RRHH indica qué problemas de decisión fueron incluidos en cada estudio. La única decisión considerada a nivel de planificación es determinar los niveles de dotación de personal por actividad (D). Las

decisiones a nivel de programación son: (a) asignación de turnos (AT), que consiste en asignar a los empleados turnos de trabajo diarios; (b) asignación de días de descanso (ADD), asignar días de descanso entre días de trabajo a empleados sobre un horizonte de planificación dado (típicamente una semana); y (c) programación semanal de turnos (PST), donde los días de descanso y los turnos de trabajo son asignados simultáneamente. Finalmente, el nivel de asignación (A) consiste en la asignación simple de empleados a actividades particulares sin considerar la asignación turnos.

2. *Multifuncionalidad* (MF): Indica si el modelo usa un parámetro para representar todas las habilidades de un empleado (Par) o una variable representando si un empleado ha sido entrenado o no en una particular habilidad o un conjunto de habilidades (Var).
3. *Mano de obra homogénea o heterogénea* (MO-HH): Indica si en la modelación la fuerza laboral se considera: (a) homogénea (Hom), en este caso los empleados tienen idéntico nivel de productividad independiente del número de tareas, máquinas, o departamentos en el que estén asignados, y del número de empleados que se desempeñen simultáneamente; y (b) heterogénea (Het), donde el nivel de productividad de los empleados varía cuando los empleados son entrenados en nuevas tareas, máquinas, o departamentos.
4. *Modelación de la productividad* (MP): Indica el enfoque utilizado para modelar la pérdida/ganancia de productividad individual de los empleados una vez que son polifuncionales. Diferentes enfoques para modelar la pérdida/ganancia de productividad pueden ser encontrados en la literatura (Yang, 2007): (a) aprendizaje y olvido (A/O), donde la productividad individual de los empleados se modela como un proceso natural de aprendizaje, olvido, y reaprendizaje. Ya que la experiencia de los empleados es diferente para distintas actividades, con el tiempo serán más eficientes en algunas actividades y menos eficientes en otras; (b) matriz de productividad (M), donde se asume que cada empleado tiene diferentes habilidades, representadas por una matriz de productividad; y (c) productividad idéntica (I), donde se asume que todos los empleados tienen la misma productividad en todas las actividades.

5. *Función objetivo* (FO): Indica los tipos de costos incluidos en la función objetivo que será minimizada, y que también son considerados en nuestro enfoque. Estos son: (a) costo total de entrenamiento a los empleados (E); (b) costo total de asignación (A); (c) costo total de transferir empleados (TE); (d) costo total de contratación (C); y (e) costo total por subdotación de personal (U).
6. *Horizonte de planificación* (HP): Indica el horizonte de tiempo de solución para el problema propuesto.
7. *Método*: Indica el método de solución usado. Puede ser: (a) heurísticas (H); (b) simulación (S); y (c) optimización tradicional (OPT).
8. *Aplicación*: Indica el sector o área de aplicación del modelo.

La extensa literatura sobre polifuncionalidad demuestra el considerable esfuerzo que se ha hecho para mejorar el entendimiento sobre este tema, tanto para la industria de manufactura como para el sector servicios. La Tabla 2-1 muestra que existen relativamente pocos modelos de optimización en la gestión de los RRHH que incorporan la polifuncionalidad como una variable de decisión, y permitan desarrollar políticas de polifuncionalidad (Stewart et al., 1994; Bokhorst et al., 2004; Slomp et al., 2005; Easton, 2011). Típicamente, los modelos incorporan la polifuncionalidad como un dato de entrada y por lo tanto, no incluyen una variable que indique si un empleado está entrenado en un determinado conjunto de habilidades o no. Esto tiene el efecto de restringir las consideraciones de diseño y limitar las posibilidades de encontrar mejores soluciones. Adicionalmente, ninguno de estos estudios aborda la polifuncionalidad para las particularidades de la industria del retail. En resumen, la literatura ha dado poca o ninguna consideración sobre: (1) polifuncionalidad en la gestión de RRHH para la industria del retail y (2) modelos con polifuncionalidad como una variable de optimización. El presente estudio abarca ambos aspectos. La formulación matemática propuesta en este trabajo para el modelo de programación semanal de turnos con polifuncionalidad también puede ser usada en otras industrias del sector servicios.

Tabla 2-1: Características de estudios sobre polifuncionalidad en la gestión de los RRHH

| Referencia | ND-RRHH | MF | MO-HH | MP | FO | HP | Método | Aplicación |
|-------------------------|-------------|-----|-------|-----|--------|-------|--------|---------------------|
| Felan et al. (1993) | D | Par | Hom | I | — | — | S | Manufactura |
| Stewart et al. (1994) | A | Var | Hom | M | E | — | OPT | Manufactura |
| Brusco y Johns (1998) | D+AT | Par | Het | M | A | 1 día | OPT | Servicios |
| Billionnet (1999) | D+ADD | Par | Hom | I | A | 1sem | OPT | — |
| Campbell (1999) | A | Par | Het | M | — | — | OPT+H | Salud |
| Molleman y Slomp (1999) | A | Par | Het | M | — | — | OPT+S | Manufactura |
| Felan y Fry (2001) | A | Par | Het | A/O | — | — | S | Servicios |
| Slomp y Molleman (2002) | A | Par | Hom | I | — | — | OPT+H | Manufactura |
| Agnihotri et al. (2003) | A | Par | Hom | I | — | — | S | Manufactura |
| Bokhorst et al. (2004) | A | Var | Hom | I | — | — | OPT+S | Manufactura |
| Inman et al. (2004) | D | Par | Hom | I | — | — | S | Manufactura |
| Slomp et al. (2005) | A | Var | Het | M | E | — | OPT | Manufactura |
| Batta et al. (2007) | D+AT | Par | Het | M | A+TE+U | — | OPT+H | Centros de llamadas |
| Seckiner et al. (2007) | D+PST | Par | Hom | I | A | 1sem | OPT | — |
| Yang (2007) | A | Par | Het | M | — | — | S | Manufactura |
| Brusco (2008) | A | Par | Het | M | — | — | OPT | Salud |
| Kim y Nembhard (2010) | D+AT | Par | Het | A/O | — | 1 día | OPT | Manufactura |
| Rong (2010) | D+PST | Par | Hom | I | A + C | 4sem | OPT | Servicios |
| Campbell (2011) | A+ADD | Par | Het | M | — | — | OPT+H | Salud |
| Easton (2011) | D+PST+ A | Var | Het | M | A + C | — | OPT+S | Servicios |

Cualquier esfuerzo en polifuncionalidad debe ser construido sobre un problema de programación de personal. La literatura muestra un amplio rango de investigaciones que trabajan con diferentes problemas de programación de personal, que involucran diferentes

métodos de solución y áreas de aplicación. Para una exhaustiva revisión de literatura, nosotros los referimos a Alfares (2004), Ernst et al. (2004a), Ernst et al. (2004b), y Van den Bergh et al. (2013). Dentro del sector servicios, las industrias más mencionadas en la literatura sobre programación de personal son transporte, salud, centros de llamadas y retail. Los problemas de programación de personal en estas industrias usualmente comparten el siguiente conjunto de restricciones, que los hacen más difíciles de resolver en comparación a un problema equivalente en industrias del sector manufactura: (1) contratos laborales (e.g., *full-time* vs. *part-time*, días mínimos/máximos de trabajo en la semana, turnos de trabajo factibles); (2) restricciones legales (e.g., máximo de horas de trabajo diarias, máximo de horas de trabajo semanales), (3) restricciones institucionales (e.g., duración y número de turnos), y (4) preferencias personales del empleado, las cuales restan flexibilidad al programa de trabajo a cambio de satisfacer las necesidades personales de los empleados.

En la industria del transporte, la programación de personal se conoce como programación de turnos a tripulación. Ernst et al. (2004b) indica que los aspectos comunes en la programación de turnos a tripulación son: (1) la dimensión temporal y espacial, esto es, cada tarea es caracterizada por su hora de inicio y origen, y por su hora de término y destino; y (2) las tareas usualmente son establecidas por un cronograma conocido. En la industria de la salud, los estudios se concentran mayoritariamente en la programación de turnos a enfermeras. En este caso, la programación de turnos debe proveer enfermeras adecuadamente calificadas para cubrir la demanda resultante del número esperado de pacientes. La programación de turnos a enfermeras y a tripulación son los problemas más comunes y estudiados en el sector servicios (Van den Bergh et al. 2013). A diferencia de la programación de turnos a tripulación, la programación de turnos en retail no involucra una característica geográfica (o espacial) (Ernst et al., 2004b). Sin embargo, a diferencia de aplicaciones en problemas de programación de turnos a tripulación, en un problema de programación de turnos en retail el número exacto de tareas que se requiere satisfacer no es conocido a priori. En la industria retail, la demanda no solo varía fuertemente durante el transcurso de una semana, si no también durante el transcurso de cada hora del día. En

consecuencia, el inicio y duración de los turnos debe ser variado con el fin de minimizar el descalce entre la oferta y la demanda laboral. Finalmente, la estructura de los problemas de programación de turnos de personal en los centros de llamadas es bastante similar al caso retail, sin embargo, la estructura de su demanda y costos de entrenamiento podrían diferir significativamente.

2.3. El problema

El problema propuesto en este estudio consiste en asignar turnos de trabajo y diseñar un plan de capacitación asociado para una fuerza laboral conocida, que inicialmente sólo cuenta con una función de especialista. El problema de programación de personal decide de manera simultánea cuántos empleados serán polifuncionales, qué habilidades deberá adquirir cada uno de ellos, y cuáles serán sus patrones diarios de turnos y días de descanso para un horizonte de planificación de una semana. Sin pérdida de generalidad, el modelo asumirá el contexto de una tienda de retail donde los empleados podrían ser entrenados para trabajar en distintos departamentos (actividades) convirtiéndose en polifuncionales.

La presencia de personal polifuncional hace más difícil el problema de programación de turnos de trabajo semanal por las siguientes razones: (1) El problema de programación de personal deja de ser separable por departamento. (2) Las posibilidades de asignación a los empleados aumentan. Como explican Cai y Li (2000), el problema de gestión de personal es en general muy difícil de resolver, incluso cuando se considera una versión simplificada contando sólo con personal especializado. Ellos explican que el problema es conocido por ser NP-completo y por lo tanto cuando se considera personal polifuncional el problema es incluso más difícil de resolver. (3) El problema puede ser no tratable computacionalmente para instancias grandes, dado la naturaleza del problema entero y la gran cantidad de variables y restricciones que se generan. Batta et al. (2007) comentan que, dado estas dos fuentes de complejidad, se requeriría un significativo esfuerzo computacional para resolver a optimalidad los problemas que involucran personal polifuncional.

Nuestra formulación del problema refleja los siguientes supuestos: (1) La información que alimenta el MPLEM es determinista. Es decir, no se considera incertidumbre en la demanda, ni el ausentismo no programado de personal. (2) No se considera en la programación de turnos el periodo de descanso para colación. Aunque incluirlo generaría programas más realistas para aplicaciones prácticas, también aumentaría considerablemente el tamaño y la complejidad del problema combinatorial con polifuncionalidad. (3) La demanda de personal para cada departamento, periodo, y día se asume conocida y puede satisfacerse de forma parcial. Costos de subdotación son por lo tanto considerados en la función objetivo. Nosotros asumimos que este costo varía por departamento y es independiente del nivel de subdotación. Aquellos departamentos con ingresos promedio (\$/periodo) más altos tienen asociado un costo por subdotación mayor, por el impacto negativo que tendría la demanda insatisfecha de esos departamentos en el ingreso total bruto de la tienda. (4) Las demandas entre periodos (consecutivos y no consecutivos) son independientes. Este supuesto es poco realista, pero es un supuesto común, e implica que el deterioro en el nivel de servicio que se genera por la demanda insatisfecha en un periodo de tiempo, no afecta o se propaga a los periodos siguientes. (5) Las transferencias de empleados solo están permitidas entre días de la semana, y no entre periodos del día. (6) Al inicio del horizonte los empleados están trabajando bajo varios tipos de contratos (i.e., *full-time* y *part-time*) e inicialmente todos son especialistas, es decir, están entrenados para trabajar en un sólo departamento de la tienda. (7) La mano de obra es homogénea. Para la industria del retail no es muy importante considerar mano de obra heterogénea porque el nivel de complejidad de las tareas no es tan alto y variado como puede ocurrir en la industria del sector manufactura, donde generalmente la mano de obra es considerada heterogénea. (8) Se ignoran los tiempos de entrenamiento (i.e., tiempo de entrenamiento igual a cero). (9) No se consideran preferencias personales de ningún tipo por parte de los empleados. (10) No se consideran contrataciones y despidos dado que el horizonte de planificación es muy corto. Finalmente, (11) no hay variación de la jornada de trabajo durante la semana. Es decir, la duración de la jornada asignada a cada empleado debe ser la misma para todos los días laborales de la semana.

2.4. Formulación del modelo

Esta sección describe la formulación del MPLEM para el problema de programación semanal de turnos de trabajo con polifuncionalidad, descrito en la sección previa. Se comienza definiendo los conjuntos del modelo, parámetros, variables y su notación correspondiente.

Conjuntos del modelo:

- D Días de la semana, indizado en d
- P Periodos de tiempo en un día, indizado en p
- C Tipos de contrato, indizado en c . Cada contrato tiene asociado un número máximo de horas de trabajo por semana
- T Turnos de trabajo, indizado en t . Define un periodo de entrada y de salida al trabajo
- J Jornadas de trabajo, indizado en j . Define la duración de un turno de trabajo. Por ejemplo un turno de trabajo puede definirse de 9:00 a las 18:00 horas, lo que significa una jornada de trabajo de 9 horas
- R Secuencias de días a trabajar, indizado en r . Cada secuencia de días es un arreglo de siete valores binarios que indica los días de trabajo (1) y descanso (0)
- A Agrupaciones de jornadas, indizado en a . Forma de distribuir las horas semanales de trabajo en días a trabajar. Por ejemplo, para un contrato *full-time* sería {5 días; 9 h/día} o {6 días; 7.5 h/día}
- I Empleados, indizado en i
- L Departamentos de la tienda, indizado en l

A partir de estos conjuntos se definen los siguientes conjuntos derivados:

- T_c Turnos factibles para los empleados con tipo de contrato c , $\forall c \in C$, $T_c \subseteq T$

- T_{cj} Turnos factibles para los empleados con tipo de contrato c y tipo de jornada j ,
 $\forall c \in C, j \in J_c, T_{cj} \subseteq T_c$
- J_c Jornadas factibles para los empleados con tipo de contrato c , $\forall c \in C, J_c \subseteq J$
- R_c Secuencias de días laborales factibles para los empleados con tipo de contrato c ,
 $\forall c \in C, R_c \subseteq R$
- R_{cj} Secuencias de días laborales factibles para los empleados con tipo de contrato c y
 tipo de jornada j , $\forall c \in C, j \in J_c, R_{cj} \subseteq R_c$
- A_c Agrupaciones de jornadas factibles para los empleados con tipo de contrato c ,
 $\forall c \in C, A_c \subseteq A$
- A_{cj} Agrupaciones de jornadas factibles para los empleados con tipo de contrato c y
 tipo de jornada j , $\forall c \in C, j \in J_c, A_{cj} \subseteq A_c$
- I_c Empleados actuales con tipo de contrato c , $\forall c \in C$
- L_i Departamentos de la tienda para los cuales el empleado actualmente contratado i
 podría ser entrenado, tal que $L_i \subseteq L, \forall i \in I$

Parámetros del modelo:

- c_l Costo de entrenar a un empleado para trabajar en el departamento l , $\forall l \in L$. Se
 asume que el costo de entrenamiento no depende del empleado
- w_c Salario base de un empleado con tipo de contrato c , $\forall c \in C$. Equivalente al costo
 de asignación de empleados. Un empleado *part-time* es más costoso que un
 empleado *full-time*

- p_l Costo de subdotación por empleado-periodo (equivalente al costo esperado por ventas perdidas) en el departamento l , $\forall l \in L$
- r_{lpd} Número de empleados requeridos en el departamento l , en el periodo p , en el día d , $\forall l \in L, p \in P, d \in D$
- s_t, e_t Inicio y final del turno de trabajo t , $\forall t \in T$
- u_p, b_p Inicio y final del período p , $\forall p \in P$
- h_j Duración de la jornada de trabajo j , $\forall j \in J$
- τ_{crd} Igual a 1 si un empleado bajo el tipo de contrato c durante la secuencia de días r debe trabajar en el día d , de otra forma igual a 0, $\forall r \in R_c, d \in D, c \in C$
- η_{caj} Cantidad de días de trabajo semanales bajo el tipo de contrato c en la agrupación de jornada a para la jornada j , $\forall a \in A_c, j \in J_c, c \in C$
- m_i Cantidad máxima de departamentos en que el empleado i puede ser entrenado para trabajar; $\forall i \in I$

VARIABLES DE DECISIÓN DEL MODELO:

- x_{il} Es igual a 1 si el empleado i es entrenado en el departamento l , de otra forma igual a 0, $\forall i \in I, l \in L_i$
- v_{cildj} Es igual a 1, si el empleado i con tipo de contrato c se asigna al departamento l en el día d con la jornada j , de otra forma 0, $\forall i \in I_c, c \in C, l \in L, d \in D, j \in J_c$
- γ_{cildt} Es igual a 1 si el empleado i con tipo de contrato c se asigna al departamento l en el día d con el turno t , de otra forma 0, $\forall i \in I_c, c \in C, l \in L, d \in D, t \in T_c$

δ_{cia} Es igual a 1 si al empleado i con tipo de contrato c se le asigna la agrupación de jornada a , de otra forma 0, $\forall i \in I_c, a \in A_c, c \in C$

ψ_{cir} Es igual a 1, si al empleado i con tipo de contrato c se le asigna la secuencia de días r , de otra forma 0, $\forall i \in I_c, r \in R_c, c \in C$

o_{lpd} Oferta de empleados para trabajar en el departamento l , periodo p , y día d , $\forall l \in L, p \in P, d \in D$

κ_{lpd} Subdotación de empleados en el departamento l , periodo p , y día d , $\forall l \in L, p \in P, d \in D$

El modelo de programación lineal entera mixta es formulado a continuación:

$$\text{Min} \quad \sum_{c \in C} \sum_{j \in J_c} w_c h_j \underbrace{\sum_{i \in I_c} \sum_{l \in L} \sum_{d \in D} v_{cildj}}_{(a)} + \underbrace{\sum_{c \in C} \sum_{i \in I_c} \sum_{l \in L} c_l x_{il}}_{(b)} + \sum_{l \in L} p_l \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \kappa_{lpd} \quad (2.1)$$

s.a.

$$o_{lpd} + \kappa_{lpd} \geq r_{lpd} \quad \forall l \in L, p \in P, d \in D \quad (2.2)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I_c} \sum_{t \in T_c: s_t \leq u_p \wedge e_t \geq b_p} \gamma_{cildt} = o_{lpd} \quad \forall l \in L, p \in P, d \in D \quad (2.3)$$

$$\gamma_{cildt} \leq x_{il} \quad \forall c \in C, i \in I_c, l \in L, d \in D, t \in T_c \quad (2.4)$$

$$\sum_{l \in L} x_{il} \leq m_i \quad \forall i \in I \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in J_c} \sum_{l \in L} v_{cildj} \leq 1 \quad \forall c \in C, i \in I_c, d \in D \quad (2.6)$$

$$\sum_{a \in A_c} \delta_{cia} = 1 \quad \forall c \in C, i \in I_c \quad (2.7)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{l \in L} v_{cildj} = \sum_{a \in A_j} \delta_{cia} \eta_{caj} \quad \forall c \in C, i \in I_c, j \in J_c \quad (2.8)$$

$$\sum_{r \in R_c} \psi_{cir} = 1 \quad \forall c \in C, i \in I_c \quad (2.9)$$

$$\sum_{l \in L} v_{cildj} = \sum_{r \in R_{cj}} \psi_{cir} \tau_{crd} \quad \forall c \in C, i \in I_c, d \in D, j \in J_c \quad (2.10)$$

$$\sum_{t \in T_{cj}} \gamma_{cildt} = v_{cildj} \quad \forall c \in C, i \in I_c, l \in L, d \in D, j \in J_c \quad (2.11)$$

$$x_{il} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, l \in L_i \quad (2.12)$$

$$v_{cildj} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, i \in I_c, l \in L, d \in D, j \in J_c \quad (2.13)$$

$$\gamma_{cildt} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, i \in I_c, l \in L, d \in D, t \in T_c \quad (2.14)$$

$$\delta_{cia} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, i \in I_c, a \in A_c \quad (2.15)$$

$$\psi_{cir} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, i \in I_c, r \in R_c \quad (2.16)$$

$$\kappa_{lpd} \geq 0 \quad \forall l \in L, p \in P, d \in D \quad (2.17)$$

$$o_{lpd} \geq 0 \quad \forall l \in L, p \in P, d \in D \quad (2.18)$$

La función objetivo (FO) (2.1) minimiza los siguientes costos semanales: (a) salarios de empleados; (b) entrenamiento de empleados; y (c) subdotación de personal. Esta estructura de costos es comúnmente usada en el sector manufactura y en el sector servicios (ver Tabla 2-1). Las restricciones (2.2) y (2.17) entregan el nivel de subdotación (no negativo) asociado a cada departamento, período, y día de la semana. Las restricciones (2.3) son usadas para calcular las variables auxiliares o_{lpd} , las cuales serán posteriormente usadas para calcular las métricas de desempeño que determinan el impacto de la polifuncionalidad. Estas restricciones garantizan que cada período del día (definido por los parámetros u_p y b_p) sólo puedan ser cubiertos por empleados que hayan sido asignados a turnos de trabajo que incluyen dicho período del día (i.e., $\forall t \in T_c : s_t \leq u_p$ y $e_t \geq b_p$). Las restricciones (2.4) aseguran que cada empleado sea asignado a trabajar en un departamento, si y sólo si está entrenado en ese departamento. Las restricciones (2.5) establecen un límite superior sobre el número de departamentos en los que puede ser entrenado cada empleado. Las restricciones (2.6) aseguran que cada empleado a lo más podrá ser asignado a trabajar en un departamento por día. Las restricciones (2.7) aseguran la asignación de una sola agrupación de jornada para cada empleado según sea su tipo de

contrato. Las restricciones (2.8) garantizan que los empleados trabajen exactamente la cantidad de días de trabajo exigidos por la agrupación de jornada que se les asignó. Las restricciones (2.9) aseguran la asignación de una sola secuencia de días a trabajar para cada empleado según sea su tipo de contrato. Las restricciones (2.10) garantizan que haya consistencia entre los días de trabajo asignados al empleado v_{cildj} y la secuencia de días de trabajo ψ_{cir} . Las restricciones (2.11) aseguran que si un empleado es asignado a trabajar bajo un tipo jornada particular (v_{cildj}), su turno de trabajo asignado (γ_{cildt}) debe pertenecer al conjunto de turnos factibles (T_{cj}) determinado por su tipo de contrato y su tipo de jornada asignada. Finalmente, las restricciones (2.12) – (2.18) definen el dominio de cada variable del problema. Notar que dada la naturaleza de las restricciones, no hay necesidad de declarar las variables o_{lpd} y κ_{lpd} como variables enteras. Notar también que el conjunto de variables v_{cildj} y o_{lpd} pueden ser eliminadas del modelo reemplazando (2.3) y (2.11) donde corresponda, produciendo una formulación más simple. Este conjunto de variables se mantuvo en la formulación debido a que ayudan a entender mejor el modelo y porque podrían llegar a ser útiles para resolver instancias muy grandes del problema.

Finalmente, esta formulación matemática fue comparada con la de Seckiner et al. (2007), Rong (2010) y Easton (2011) quienes también trabajaron con el problema de programación semanal de turnos de trabajo con polifuncionalidad (Ver Tabla 2-1). A diferencia de Easton (2011) y de nuestro estudio, los primeros dos artículos consideraron empleados que ya eran polifuncionales. Seckiner et al. (2007) encontraron soluciones óptimas utilizando el algoritmo Branch & Bound. Su estudio consideró un problema de programación semanal de turnos de trabajo donde los turnos sólo tenían tres duraciones posibles. Rong (2010) abordó un problema de programación semanal de turnos de trabajo para un horizonte de planificación mensual. Simultáneamente, su modelo también optimizaba para cada día la ubicación del periodo de tiempo libre para colación. Sin embargo, su formulación asumía que cada empleado iniciaba su turno de trabajo a la misma hora cada día. Easton (2011) trabajó con un problema de programación semanal de turnos de trabajo con decisiones de dotación de personal. Sin embargo, su modelo es bastante agregado, ya que no asigna

turnos específicos a cada empleado. Rong (2010) y Easton (2011) resolvieron sus modelos de programación lineal entera usando el software comercial CPLEX.

2.5. Experimentos y resultados

Esta sección describe los experimentos realizados para evaluar el impacto de la polifuncionalidad bajo diferentes escenarios de prueba, y presenta los resultados obtenidos. El modelo (2.1)-(2.18) fue escrito en AMPL y el problema fue resuelto utilizando el software comercial ILOG CPLEX 12.4.0.1 ejecutándose en un servidor Dell PowerEdge R210 II con un procesador de 1333 MHz y 16 GB (4×4 GB) de RAM.

El modelo fue aplicado a una tienda de Mejoramiento del Hogar en la ciudad de Santiago de Chile, sólo para su personal de venta asistida. Estos empleados son asignados a diferentes departamentos. Un departamento es una unidad de negocio de la tienda y a ese nivel es donde se toman las decisiones de dotación de personal, entrenamiento, y programación semanal de turnos de trabajo de los empleados.

Todas las pruebas comparten las siguientes características:

1. Los parámetros de costo y demanda de personal en cada departamento fueron obtenidos a partir de información real suministrada por una tienda de retail de Santiago, Chile.
2. Tres tipos de contratos de trabajo con distintos niveles de flexibilidad fueron definidos para el problema propuesto de programación de personal, basados en las prácticas establecidas en el sector retail de Chile: (a) FT45, para empleados *full-time* que trabajan 45 horas semanales; (b) PT30, para empleados *part-time* que trabajan 30 horas semanales; y PT20, para empleados *part-time* que trabajan 20 horas semanales.
3. Hay cinco jornadas de trabajo posibles (5, 6, 7.5, 9 y 10 horas) que pueden ser asignadas a los empleados dependiendo su tipo de contrato.

4. La periodización de la demanda por personal se expresa en intervalos de 30 minutos entre las 8:00 y 22:00 horas.
5. Inicialmente cada empleado es especialista y por lo tanto sólo está entrenado para trabajar en un departamento de la tienda.
6. Los empleados pueden ser entrenados en cualquiera de los departamentos de la tienda.
7. Todos los empleados pueden ser programados a trabajar en cualquier momento de un día en que los asignen a trabajar. Todos pueden trabajar en cualquier agrupación de jornada y secuencia de días de trabajo y descanso que sea viable según su contrato.

Las últimas dos características del listado implican que las pruebas realizadas tendrán la máxima flexibilidad posible, y por lo tanto, la complejidad de cada problema será máxima.

En la primera fila de la Tabla 2-2 se presentan las diferentes estructuras de turnos que pueden ser consideradas para cada uno de los tres tipos de contrato. La segunda fila indica cuántas diferentes horas de inicio de turnos pueden ser consideradas durante cada día de trabajo. Finalmente, la tercera fila muestra cuántas secuencias de días de trabajo deben ser consideradas. En la Tabla 2-3 se presenta un ejemplo de cómo estas figuras son obtenidas para las estructuras de turnos $\{6 \times 7.5\}$ FT45 (i.e., un empleado trabaja 6 días a la semana, 7.5 horas por día) y $\{5 \times 6\}$ PT30. En nuestro caso, los turnos sólo pueden iniciar cada 30 minutos y son limitados por las horas de operación de la tienda (i.e., 8:00-22:00). Por otro lado, el número de secuencias de días de trabajo posibles se puede obtener a partir de la siguiente expresión: $C(7, k) = (7!) / ((7 - k)!k!)$, donde k corresponde al número de días laborales por semana. En la Tabla 2-3, los arreglos posibles se presentan en términos de días laborales (1) y días de descanso (0).

Tabla 2-2: Cantidad de alternativas de turnos de trabajo por día y por semana para cada tipo de contrato

| Características del contrato | Contrato | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------|-------|-------|-------|---------|--------|-------|--------|
| | FT45 | | PT30 | | | | PT20 | |
| Agrupación de jornada (días x h/día) | {6x7.5} | {5x9} | {6x5} | {5x6} | {4x7.5} | {3x10} | {4x5} | {2x10} |
| Turnos de trabajo por día | 14 | 11 | 19 | 17 | 14 | 9 | 19 | 9 |
| Secuencias de días de trabajo | 7 | 21 | 7 | 21 | 35 | 35 | 35 | 21 |

Tabla 2-3: Ejemplo de alternativas específicas de turnos por día de trabajo y secuencias de días de trabajo para dos estructuras de turnos

| | Turnos por día de trabajo Inicio turno - Fin turno | | | Secuencias de días de trabajo Lu-Ma-Mi-Ju-Vi-Sa-Do | | |
|-----------------|---|-------------|---------------|---|---------------|---------------|
| FT45 {6x7.5} | 8:00-15:30 | 8:30-16:00 | 9:00-16:30 | 0-1-1-1-1-1-1 | 1-0-1-1-1-1-1 | 1-1-0-1-1-1-1 |
| | 9:30-17:00 | 10:00-17:30 | 10:30-18:00 | 1-1-1-0-1-1-1 | 1-1-1-1-0-1-1 | 1-1-1-1-1-0-1 |
| | 11:00-18:30 | 11:30-19:00 | 12:00-19:30 | 1-1-1-1-1-1-0 | | |
| | 12:30-20:00 | 13:00-20:30 | 13:30-21:00 | | | |
| | 14:00-21:30 | 14:30-22:00 | | | | |
| PT30 {5x6} | 8:00-14:00 | 8:30-14:30 | 9:00-15:00 | 0-0-1-1-1-1-1 | 0-1-0-1-1-1-1 | 0-1-1-0-1-1-1 |
| | 9:30-15:30 | 10:00-16:00 | 10:30-16:30 | 0-1-1-1-0-1-1 | 0-1-1-1-1-0-1 | 0-1-1-1-1-1-0 |
| | 11:00-17:00 | 11:30-17:30 | 12:00-18:00 | 1-0-0-1-1-1-1 | 1-0-1-0-1-1-1 | 1-0-1-1-0-1-1 |
| | 12:30-18:30 | 13:00-19:00 | 13:30-19:30 | 1-0-1-1-1-0-1 | 1-0-1-1-1-1-0 | 1-1-0-0-1-1-1 |
| | 14:00-20:00 | 14:30-20:30 | 15:00-21:00 | 1-1-0-1-0-1-1 | 1-1-0-1-1-0-1 | 1-1-0-1-1-1-0 |
| | 15:30-21:30 | 16:00-22:00 | | 1-1-1-0-0-1-1 | 1-1-1-0-1-0-1 | 1-1-1-0-1-1-0 |
| | | | 1-1-1-1-0-0-1 | 1-1-1-1-0-1-0 | 1-1-1-1-1-0-0 | |

Con el objeto de establecer el impacto de la polifuncionalidad sobre la gestión de los RRHH, se realiza una comparación de los resultados obtenidos con el uso de la polifuncionalidad versus los resultados obtenidos sólo con personal especializado. Para realizar esta comparación el análisis se centra en torno a métricas de desempeño asociadas

a calificar el NDS entregado a los clientes, los costos totales asociados a cada instancia probada, y al uso de la polifuncionalidad. Las métricas utilizadas son las siguientes:

Cobertura total porcentual de la demanda en la semana.

$$\% Cob = \frac{\sum_{l \in L} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \min(r_{lpd}, o_{lpd})}{\sum_{l \in L} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} r_{lpd}} \cdot 100$$

Sobredotación total porcentual en la semana.

$$\% Sob = \frac{\sum_{l \in L} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \max(o_{lpd} - r_{lpd}, 0)}{\sum_{l \in L} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} r_{lpd}} \cdot 100$$

Porcentaje de empleados polifuncionales. Es decir, el número de empleados polifuncionales usados en la solución de la instancia en relación al número total de empleados.

$$\% EP = \frac{\text{Total_Empleados_Polifuncionales}}{|I|} \cdot 100$$

Porcentaje de polifuncionalidad total. Es decir, el número de habilidades adicionales entrenadas en la solución de la instancia en relación a la cantidad máxima teórica posible.

$$\% PT = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{l \in L_i} x_{il}}{|I|(|L|-1)} \cdot 100$$

2.5.1. Escenarios

Con la finalidad de evaluar y comparar los resultados del modelo bajo distintas condiciones operativas, el problema fue resuelto para seis Tamaños de Tienda (TT) con 5, 7, 10, 15, 17 y 20 departamentos en cada uno de ellos. El primer TT incluye cinco departamentos mientras que el sexto y último tiene 20 departamentos, lo que cubre toda la

tienda. Para cada TT fueron evaluados seis escenarios de prueba, cada uno correspondiente a diferentes combinaciones de niveles de dotación de personal, y estatus de polifuncionalidad. Se usaron tres niveles de dotación posibles, definidos por la relación entre la oferta total y la demanda total de personal: (1) *Alta* (110%), la oferta total es 10% mayor a la demanda total; (2) *Equilibrada* (100%), hay balance entre la oferta total y la demanda total, y (3) *Baja* (90%), la oferta total es 10% inferior a la demanda total por personal. Mientras que para el estatus de polifuncionalidad se usaron dos posibilidades: todos especialistas, esto es, empleados entrenados en un sólo departamento, o todos potencialmente entrenables en cualquier departamento. Entonces, los 36 escenarios conformados son identificados con un código de tres caracteres i-j-k, donde i= 5, 7, 10, 15, 17, 20 indica el número de departamentos; j= A, E, B indica el nivel de dotación de personal o la razón entre la oferta total y demanda total por personal (Alta, Equilibrada, Baja); y k= S, P indica estatus de la polifuncionalidad (todo el personal especializado (S) o potencialmente entrenable (P)).

La Tabla 2-4 muestra para cada TT y cada escenario, el nivel de dotación y el porcentaje de horas-hombre *part-time* en relación a la cantidad total (i.e., PT). Estas características son comunes a ambos estatus de polifuncionalidad (S ó P), y por lo tanto esta dimensión ha sido omitida del código del escenario (Esc). Además, notar que PT (%) se mantuvo relativamente constante a través de todos los escenarios de cada TT.

Cada uno de los 20 departamentos considerados en el análisis tiene un costo de subdotación (p_l) diferente. En el caso de estudio, el costo más alto de subdotación es aproximadamente nueve veces mayor que en el departamento con costo más bajo. Con respecto al costo de entrenamiento (c_l), se asumió mínimo e igual para todos los departamentos. Esto permite interpretar el resultado del modelo como una cota máxima para el potencial de la polifuncionalidad en el desempeño de la tienda.

Tabla 2-4: Características de los escenarios

| TT | Esc | Dotación | PT (%) | TT | Esc | Dotación | PT (%) |
|----|------|----------|--------|----|------|----------|--------|
| 1 | 5-A | 26 | 48 | 4 | 15-A | 116 | 46 |
| | 5-E | 24 | 48 | | 15-E | 105 | 45 |
| | 5-B | 21 | 48 | | 15-B | 94 | 45 |
| 2 | 7-A | 37 | 45 | 5 | 17-A | 131 | 46 |
| | 7-E | 34 | 44 | | 17-E | 119 | 45 |
| | 7-B | 30 | 42 | | 17-B | 107 | 45 |
| 3 | 10-A | 69 | 45 | 6 | 20-A | 157 | 43 |
| | 10-E | 63 | 46 | | 20-E | 143 | 46 |
| | 10-B | 56 | 45 | | 20-B | 128 | 43 |

2.5.2. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios descritos anteriormente se presentan bajo los siguientes tres encabezados: (a) niveles de polifuncionalidad y de sobre/subdotación de personal; (b) la polifuncionalidad y su efecto en la composición de los contratos *full-time/part-time*; y (c) tiempos de solución. Los primeros dos encabezados describen y analizan los dos experimentos realizados sobre la data de la tienda, mientras el tercero reporta sobre el rendimiento de la ejecución del modelo.

a) Niveles de polifuncionalidad y de sobre/subdotación de personal

El objetivo de este primer experimento es examinar el efecto que tiene la polifuncionalidad sobre la cobertura de la demanda total, a medida que varía el nivel de dotación de personal y aumenta el número de departamentos simultáneamente considerados. Los resultados de una gama de indicadores de desempeño para cada escenario son recopilados en la Tabla 2-5. Se incluyen métricas definidas anteriormente para la cobertura total de la demanda (y en consecuencia el NDS), sobredotación, y grado de polifuncionalidad requerido para alcanzar la cobertura indicada. Otras métricas

incluidas en la tabla son: mejora en la cobertura de la demanda, ahorro en los costos semanales con polifuncionalidad *versus* personal especializado, y costo total.

Tabla 2-5: Métricas de desempeño: Polifuncionalidad *versus* Personal especializado

| TT | Esc | % Cob | % Sob | % EP | % PT | Costo total (US\$) | % Mejora cobertura | % Ahorro costo total |
|----|--------|-------|-------|------|------|--------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 5-A-S | 98.3 | 12.1 | — | — | 13 585 | | |
| | 5-E-S | 97.7 | 3.1 | — | — | 12 661 | | |
| | 5-B-S | 88.2 | 0.4 | — | — | 14 691 | | |
| | 5-A-P | 100 | 10.4 | 35 | 9 | 13 122 | 1.7 | 3 |
| | 5-E-P | 99.2 | 1.5 | 33 | 10 | 12 239 | 1.5 | 3 |
| | 5-B-P | 88.3 | 0.3 | 62 | 20 | 13 564 | 0.1 | 8 |
| 2 | 7-A-S | 98.4 | 11.2 | — | — | 19 397 | | |
| | 7-E-S | 97.2 | 3.1 | — | — | 18 744 | | |
| | 7-B-S | 89.2 | 0.9 | — | — | 21 756 | | |
| | 7-A-P | 100 | 9.6 | 35 | 6 | 18 795 | 1.6 | 3 |
| | 7-E-P | 98.5 | 1.7 | 38 | 10 | 17 819 | 1.4 | 5 |
| | 7-B-P | 89.7 | 0.4 | 57 | 12 | 19 066 | 0.5 | 12 |
| 3 | 10-A-S | 90.1 | 20.0 | — | — | 50 187 | | |
| | 10-E-S | 89.7 | 10.1 | — | — | 47 241 | | |
| | 10-B-S | 86.3 | 3.4 | — | — | 47 978 | | |
| | 10-A-P | 99.9 | 10.2 | 25 | 3 | 35 058 | 9.7 | 30 |
| | 10-E-P | 98.4 | 1.3 | 54 | 9 | 33 118 | 8.7 | 30 |
| | 10-B-P | 89.1 | 0.6 | 50 | 12 | 35 794 | 2.8 | 25 |
| 4 | 15-A-S | 92.5 | 17.8 | — | — | 77 819 | | |
| | 15-E-S | 91.8 | 8.2 | — | — | 73 751 | | |
| | 15-B-S | 88.5 | 1.3 | — | — | 73 799 | | |
| | 15-A-P | 98.9 | 11.4 | 22 | 2 | 60 440 | 6.4 | 22 |
| | 15-E-P | 97.8 | 2.1 | 55 | 6 | 56 671 | 6.0 | 23 |
| | 15-B-P | 89.1 | 0.7 | 47 | 7 | 60 855 | 0.6 | 18 |
| 5 | 17-A-S | 93.4 | 16.8 | — | — | 85 544 | | |
| | 17-E-S | 92.9 | 7.6 | — | — | 80 493 | | |
| | 17-B-S | 88.6 | 1.5 | — | — | 82 856 | | |
| | 17-A-P | 98.5 | 11.6 | 21 | 2 | 67 985 | 5.2 | 21 |
| | 17-E-P | 95.7 | 4.7 | 50 | 5 | 62 651 | 2.9 | 22 |
| | 17-B-P | 89.1 | 1.1 | 59 | 8 | 62 935 | 0.4 | 24 |
| 6 | 20-A-S | 96.2 | 13.7 | — | — | 91 226 | | |
| | 20-E-S | 94.6 | 5.5 | — | — | 87 795 | | |
| | 20-B-S | 89.8 | 0.6 | — | — | 97 171 | | |
| | 20-A-P | 99.7 | 10.1 | 14 | 1 | 79 382 | 3.6 | 13 |
| | 20-E-P | 96.2 | 3.8 | 50 | 5 | 76 287 | 1.7 | 13 |
| | 20-B-P | 88.5 | 1.4 | 56 | 6 | 76 738 | -1.3 | 21 |

Hay varios aspectos de los resultados dignos de destacar. El primero corresponde a observar que en todas las instancias el costo total disminuye, en algunos casos en forma muy sustancial. Esto sugiere que, en este caso en que la capacitación es tan poco onerosa, la polifuncionalidad siempre genera beneficios económicos. Asimismo, se observa que la polifuncionalidad mejora los niveles de cobertura de la demanda total aún en presencia de subdotación, pues la ganancia en flexibilidad permite un uso más eficiente de la dotación del personal. Todas las instancias mejoran su cobertura para los tres niveles de dotación (i.e., alta, equilibrada, y baja) a excepción de la instancia 20-B-P. Esta única excepción demuestra que la cobertura podría disminuir si el costo de subdotación varía significativamente entre departamentos. Este efecto es más fuerte en una situación de escasez de personal; en este caso la flexibilidad que otorga la polifuncionalidad se orienta a aprovechar ahorros en costos en desmedro de un ligero aumento en la subdotación. En estos casos el modelo opta por capacitar la fuerza laboral de departamentos de bajo costo, de modo de cubrir el déficit en departamentos con mayores costos de subdotación. Los resultados también indican que las mejoras en cobertura están en un rango que varían entre un 0.1% y un 9.7% cuando se usa polifuncionalidad.

En contraposición, los resultados también indican que hay casos donde emplear polifuncionalidad no agrega valor. Al igual que en el estudio de Jordan y Graves (1995), de aquí también se infiere que hay dos casos extremos donde agregar polifuncionalidad no tiene valor. El primer caso es cuando no hay presencia de subdotación en ningún departamento, esto implica que la oferta de personal en cada departamento es suficientemente superior a la demanda. Es decir, cuando los niveles de sobredotación de personal son elevados, basta con emplear una dotación de personal especialista para mantener un porcentaje de cobertura total de la demanda del 100%. El segundo caso es cuando los niveles de subdotación en cada departamento son muy altos y por lo tanto la oferta de personal en cada departamento es mucho menor a su demanda. Para este caso, cuanto más alto sea el costo de capacitar al personal vigente, podría ser mejor aumentar la oferta realizando contratación de personal. Es decir, en el caso por ejemplo de 20-B-S, si

aumentamos el costo de capacitación del nivel mínimo considerado en este ejercicio, podría ser preferible desplazarse a 20-E-S por sobre 20-B-P.

También se mostró que la cantidad de polifuncionalidad necesaria para mejorar los niveles de cobertura depende del tipo de relación entre la oferta total y la demanda total por personal. Para cada tipo de relación evaluada (i.e., alta, equilibrada, y baja), la Tabla 2-6 muestra el porcentaje de empleados polifuncionales (%EP), el porcentaje de la polifuncionalidad total (o máxima teórica) usada (%PT), y el porcentaje de empleados polifuncionales entrenados en uno, dos, tres, cuatro, o cinco departamentos adicionales respectivamente. Los valores mostrados son promedios más o menos una desviación estándar. A partir de las Tablas 2-5 y 2-6 se observa que a medida que disminuye la dotación de personal se emplea mayor polifuncionalidad y que en ningún caso es necesario tener un 100% de empleados polifuncionales para lograr mejoras en la cobertura de la demanda total y ahorros en los costos totales. Por lo tanto, es preferible tener estructuras de dotación de personal que combinen personal polifuncional con personal especializado. Notar también que no es necesario tener configuraciones de entrenamiento con polifuncionalidad total. Es decir, configuraciones donde cada empleado polifuncional es entrenado en todos los departamentos disponibles de la tienda. Los resultados indican que el porcentaje de la polifuncionalidad total usada oscila entre un 1% y 20% para las instancias probadas y que dentro de la fuerza laboral polifuncional dominan los empleados entrenados en un sólo departamento adicional, seguido por la presencia de empleados entrenados en dos departamentos adicionales. Este último resultado muestra que hay rendimientos decrecientes a escala al aumentar el número de habilidades entrenadas y confirma entonces la premisa de que es costoso, impráctico, e innecesario tener polifuncionalidad total.

Otro aspecto a destacar es que las configuraciones de polifuncionalidad de mínimo costo son obtenidas cuando la razón entre la oferta total y demanda total está en equilibrio (ver Tabla 2-5). Finalmente, en presencia de subdotación de personal, la polifuncionalidad siempre obtiene mayores ahorros en términos de los costos totales en comparación con los obtenidos con el uso exclusivo de personal especializado (ver Tabla 2-5), independiente

del tipo de relación entre la oferta y demanda total por personal. Esto sucede porque en la función objetivo los costos totales por subdotación de personal dominan a los costos totales por entrenamiento de personal.

Tabla 2-6: Métricas de polifuncionalidad

| Relación Oferta/Demanda | %EP $\pm \sigma$ | %PT $\pm \sigma$ | % 1H $\pm \sigma$ | % 2H $\pm \sigma$ | % 3H $\pm \sigma$ | % 4H $\pm \sigma$ | % 5H $\pm \sigma$ |
|----------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Alta | 25 \pm 8 | 4 \pm 3 | 89 \pm 9 | 8 \pm 6 | 4 \pm 4 | — | — |
| Equilibrada | 47 \pm 9 | 7 \pm 3 | 57 \pm 11 | 35 \pm 9 | 6 \pm 5 | 1 \pm 2 | — |
| Baja | 55 \pm 6 | 11 \pm 5 | 48 \pm 20 | 33 \pm 6 | 14 \pm 12 | 5 \pm 5 | 1 \pm 1 |

b) La polifuncionalidad y su efecto en la composición de los contratos *full-time/part-time*

El objetivo de este segundo experimento fue evaluar el efecto de la polifuncionalidad sobre la composición de la dotación del personal. También interesa analizar cómo la polifuncionalidad y los contratos *part-time* son fuentes complementarias de flexibilidad en la solución del problema de programación de personal para el sector retail. La Tabla 2-7 muestra indicadores que miden la presencia de la polifuncionalidad por tipo de contrato para cada una de los escenarios donde se implementó la polifuncionalidad (aquellos con “P” en el último carácter del código del escenario). Los resultados indican que a medida que aumenta el número de departamentos considerados, el porcentaje de polifuncionalidad absoluta por contrato (esto es el porcentaje de los trabajadores totales que son de un tipo de contrato y que se les asigna un rol polifuncional) es dominado generalmente por los empleados polifuncionales PT30. Este resultado es independiente del tipo de relación entre la oferta y la demanda total (i.e., alto, equilibrado, o bajo). Por otra parte, el porcentaje de polifuncionalidad relativa por contrato (esto es el porcentaje de trabajadores de un tipo de contrato a los que se les asigna un rol polifuncional) confirma la preferencia por los empleados polifuncionales con contrato PT30. Este resultado no es sorprendente, pues el contrato PT30 es el que mayor flexibilidad ofrece en la asignación de turnos con distintos

largos, y por lo tanto, es el que mejor puede aprovechar las bondades de la polifuncionalidad. Los empleados PT20, por otra parte, parecen ser la opción de contrato menos atractiva para aplicar la polifuncionalidad.

Tabla 2-7: Porcentaje de polifuncionalidad por tipo de contrato

| Esc | % Dotación por contrato | | | % Polifuncionalidad absoluta | | | % Polifuncionalidad relativa | | |
|--------|-------------------------|------|------|------------------------------|------|------|------------------------------|------|------|
| | FT45 | PT30 | PT20 | FT45 | PT30 | PT20 | FT45 | PT30 | PT20 |
| 5-A-P | 38 | 35 | 27 | 15 | 15 | 4 | 40 | 44 | 14 |
| 5-E-P | 38 | 33 | 29 | 13 | 17 | 4 | 33 | 50 | 14 |
| 5-B-P | 38 | 33 | 29 | 24 | 19 | 19 | 63 | 57 | 67 |
| 7-A-P | 41 | 32 | 27 | 16 | 8 | 11 | 40 | 25 | 40 |
| 7-E-P | 41 | 30 | 29 | 18 | 15 | 6 | 43 | 50 | 20 |
| 7-B-P | 43 | 30 | 27 | 23 | 20 | 13 | 54 | 67 | 50 |
| 10-A-P | 41 | 30 | 29 | 6 | 17 | 1 | 14 | 57 | 5 |
| 10-E-P | 40 | 30 | 30 | 19 | 25 | 10 | 48 | 84 | 32 |
| 10-B-P | 41 | 30 | 29 | 21 | 25 | 4 | 52 | 82 | 13 |
| 15-A-P | 40 | 30 | 30 | 5 | 13 | 3 | 13 | 43 | 11 |
| 15-E-P | 40 | 30 | 30 | 25 | 26 | 5 | 62 | 87 | 16 |
| 15-B-P | 40 | 30 | 30 | 20 | 21 | 5 | 50 | 71 | 18 |
| 17-A-P | 40 | 30 | 30 | 4 | 14 | 4 | 10 | 45 | 13 |
| 17-E-P | 40 | 30 | 30 | 20 | 24 | 6 | 50 | 78 | 20 |
| 17-B-P | 40 | 30 | 30 | 30 | 21 | 8 | 74 | 69 | 28 |
| 20-A-P | 42 | 28 | 30 | 3 | 10 | 2 | 6 | 35 | 6 |
| 20-E-P | 40 | 30 | 30 | 20 | 24 | 6 | 51 | 79 | 21 |
| 20-B-P | 42 | 28 | 30 | 31 | 19 | 6 | 72 | 69 | 21 |

También se observa de las Tablas 2-5 y 2-7 que a pesar de que en cada escenario se disminuye gradualmente la oferta total de empleados en relación a la demanda total, el uso de polifuncionalidad permite mejorar los niveles de cobertura, en comparación a los niveles de cobertura que se obtienen cuando se usa sólo personal especializado. Este resultado es importante, pues indica que, dependiendo del costo, los empleados polifuncionales pueden ser una alternativa más económica que incrementar unilateralmente la contratación de personal *part-time* para mejorar los niveles de cobertura de la demanda total. Finalmente, estos resultados también muestran como la polifuncionalidad y los

contratos *part-time* son fuentes complementarias de flexibilidad en la solución del problema de programación de personal y la gestión de los RRHH para el sector retail.

c) Tiempos de solución

Como es de esperar, la presencia de polifuncionalidad aumenta la complejidad computacional del problema de programación semanal de turnos. Esto se debe al incremento en las posibilidades de asignación de los empleados y la no separabilidad del problema por departamentos. La Tabla 2-8 presenta estadísticas de desempeño de la solución del problema para cada una de los escenarios probados en los 6 TT evaluados. Las estadísticas incluyen el número total de variables y restricciones generadas por CPLEX, los tiempos de solución, y el gap logrado entre la solución obtenida y la cota dual como un porcentaje de este último. En los escenarios donde el gap es diferente de 0%, CPLEX detuvo la ejecución, una vez fue alcanzada una solución entera muy cercana al óptimo, con el objeto de disminuir el tiempo de solución computacional. Dada la naturaleza combinatorial del problema, el tamaño y los tiempos de solución son fuertemente impactados por el incremento en el número de departamentos y empleados, pero también son afectados por el número de contratos distintos y la flexibilidad que ellos aportan.

Tabla 2-8: Características de la solución para cada escenario

| Esc | Dotación | PT | Variables | Restricciones | Tiempo (s) | Gap |
|-------|----------|----|-----------|---------------|------------|-----|
| 5-A-S | 26 | 48 | 10 913 | 3 244 | 74 | 0% |
| 5-A-P | | | 40 333 | 32 560 | 167 | 0% |
| 5-E-S | 24 | 48 | 10 151 | 3 136 | 114 | 0% |
| 5-E-P | | | 37 043 | 29 932 | 140 | 0% |
| 5-B-S | 21 | 48 | 9 121 | 2 989 | 2 | 0% |
| 5-B-P | | | 32 641 | 26 425 | 314 | 0% |
| 7-A-S | 37 | 45 | 15 225 | 4 547 | 99 | 0% |
| 7-A-P | | | 76 809 | 65 909 | 1 058 | 0% |
| 7-E-S | 34 | 44 | 1 392 | 4 370 | 195 | 0% |
| 7-E-P | | | 6 906 | 59 306 | 2 189 | 0% |
| 7-B-S | 30 | 42 | 12 622 | 4 184 | 23 | 0% |
| 7-B-P | | | 61 438 | 52 820 | 710 | 0% |

| Esc | Dotación | PT | Variables | Restricciones | Tiempo (s) | Gap |
|--------|----------|----|-----------|---------------|------------|------|
| 10-A-S | 69 | 45 | 26 815 | 7 241 | 3 | 0% |
| 10-A-P | | | 196 213 | 176 018 | 633 | 0.5% |
| 10-E-S | 63 | 46 | 24 804 | 6 947 | 4 | 0% |
| 10-E-P | | | 179 217 | 160 793 | 17 302 | 0% |
| 10-B-S | 56 | 45 | 22 476 | 6 614 | 44 | 0% |
| 10-B-P | | | 159 816 | 143 450 | 13 231 | 0% |
| 15-A-S | 116 | 46 | 44 339 | 11 454 | 11 | 0% |
| 15-A-P | | | 486 669 | 452 160 | 2 662 | 3.6% |
| 15-E-S | 105 | 45 | 40 487 | 10 905 | 12 | 0% |
| 15-E-P | | | 438 563 | 407 511 | 13 321 | 2.4% |
| 15-B-S | 94 | 45 | 36 910 | 10 386 | 68 | 0% |
| 15-B-P | | | 393 966 | 366 126 | 11 215 | 0.4% |
| 17-A-S | 131 | 46 | 50 224 | 12 973 | 61 | 0% |
| 17-A-P | | | 622 848 | 583 501 | 7 619 | 3.1% |
| 17-E-S | 119 | 45 | 46 104 | 12 385 | 97 | 0% |
| 17-E-P | | | 564 776 | 529 153 | 12 854 | 2.8% |
| 17-B-S | 107 | 45 | 42 033 | 11 797 | 98 | 0% |
| 17-B-P | | | 507 089 | 475 141 | 5 887 | 0.5% |
| 20-A-S | 157 | 43 | 58 288 | 15 214 | 338 | 0.1% |
| 20-A-P | | | 846 484 | 800 446 | 10 068 | 0.8% |
| 20-E-S | 143 | 46 | 55 196 | 14 707 | 4 770 | 0.1% |
| 20-E-P | | | 794 467 | 751 261 | 8 831 | 3.5% |
| 20-B-S | 128 | 43 | 48 855 | 13 843 | 81 | 0.1% |
| 20-B-P | | | 690 067 | 652 642 | 23 869 | 0.9% |

2.6. Conclusiones y futura investigación

El análisis de los resultados entregado por este estudio brinda una base para el diseño de políticas de polifuncionalidad que son atractivas y viables para las empresas de retail. Dichas políticas van dirigidas a responder dos preguntas fundamentales: Cuánto y cómo agregar la polifuncionalidad. La respuesta a la primera pregunta depende de la razón entre la oferta total y la demanda total por personal. Se observa que a medida que disminuye la dotación de personal se emplea mayor polifuncionalidad, pero que en ningún caso es necesario que todos los empleados sean polifuncionales. Adicionalmente, no es necesario tener configuraciones de entrenamiento con polifuncionalidad total. Es decir, configuraciones donde cada empleado polifuncional es entrenado en todos los

departamentos disponibles de la tienda. Es más, los resultados indican que dominan aquellos empleados que requieren ser entrenados en un sólo departamento adicional, aun cuando el costo de capacitación se dispuso a un nivel mínimo. Esto sugiere que la polifuncionalidad total no es sólo costosa sino también innecesaria.

Para la segunda pregunta – cómo agregar la polifuncionalidad – los resultados mostraron que las configuraciones de polifuncionalidad de mínimo costo se obtienen cuando la relación entre la oferta total y la demanda total está en equilibrio. Luego, la mejor forma de agregar polifuncionalidad es generando estructuras de dotación de personal que combinen personal polifuncional con personal especializado.

Otros experimentos evaluaron el efecto de la polifuncionalidad sobre la composición de la dotación de personal y los contratos. Los resultados también muestran que es preferible dotar de polifuncionalidad a empleados que permitan una alta flexibilidad respecto de la forma de distribuir sus horas a lo largo de la semana, como es el caso en nuestro estudio de los empleados con contrato *part-time* de 30 horas.

Adicionalmente se concluyó que los empleados polifuncionales podrían ser una alternativa más económica que incrementar la contratación de personal *part-time* para mejorar los niveles de cobertura de la demanda total, dependiendo de los costos de capacitar al personal vigente versus los de contratar personal *part-time*. Los resultados muestran que la polifuncionalidad y los contratos *part-time* son fuentes complementarias de flexibilidad en la solución del problema de programación de personal y la gestión de los RRHH para el sector retail.

Trabajos futuros en esta área podrían buscar levantar supuestos realizados en la modelación e incorporar los siguientes elementos: (1) Dada la estrecha relación entre los niveles de dotación de personal y la polifuncionalidad, se podría incorporar en la modelación una variable de decisión que determine los niveles de dotación adicionales requeridos por tipo de contrato (*full-time*, *part-time*) y departamento, y estudiar un horizonte de planificación mayor. (2) Considerar incertidumbre en la oferta y la demanda

por personal para generar soluciones más robustas. (3) Considerar otras funciones en la tienda, tales como actividades de reposición de inventarios, cuyas demandas por personal puedan estar correlacionadas negativamente con las demandas por personal de actividades asociadas a la venta (cajas y venta asistida). La polifuncionalidad puede ser altamente efectiva en cubrir las curvas de demanda, para dos o más actividades que estén correlacionadas negativamente entre distintos días de la semana.

3. POLIFUNCIONALIDAD CON CADENAS CERRADAS EN EL SECTOR SERVICIOS: UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN ROBUSTA

César A. Henao¹, Juan Carlos Ferrer², Juan Carlos Muñoz¹ y Jorge R. Vera²

¹Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile; y ²Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Resumen. La inherente variabilidad y estacionalidad de la demanda genera un descalce natural entre la oferta planificada y la demanda observada en las empresas del sector servicios. El uso de personal polifuncional es una fuente de flexibilidad atractiva para mejorar los niveles de servicio y reducir los costos de subdotación y sobredotación de personal. Este trabajo presenta un modelo determinístico de programación lineal entera mixta y una heurística constructiva para estructurar las habilidades polifuncionales de un conjunto de empleados. Para incorporar explícitamente la incertidumbre de la demanda en el modelo de optimización, se utiliza un enfoque de optimización robusta. Posteriormente, mediante simulación Montecarlo se analiza el desempeño de las soluciones robustas para distintos niveles de variabilidad en la demanda y distintos niveles de aversión al riesgo en las soluciones. La metodología arroja estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas cerradas, con distintos largos, que proveen un excelente desempeño a nivel costo-efectivo para cada nivel de variabilidad de la demanda. También se obtienen lineamientos para los tomadores de decisiones que les permitan elegir un nivel apropiado de aversión al riesgo, obteniendo un plan de capacitación que alcanza la mayoría del beneficio total por el uso de la polifuncionalidad, pero que requiere una inversión en polifuncionalidad mucho menor a la exigida por la solución robusta más conservadora.

3.1. Introducción

El sector servicios, y en particular la industria de retail, enfrentan fenómenos predecibles como la estacionalidad de la demanda, y no predecibles como su incertidumbre y el ausentismo no programado de personal. Estos fenómenos complican la gestión eficiente de los recursos humanos, pues dificultan el calce entre la oferta y la demanda de personal (Henaó et al., 2015). Como resultado, incluso retailers con un buen sistema de programación de personal pueden enfrentar problemas de sobredotación y subdotación en varios momentos durante el curso de una semana, y en el último caso el desbalance generado puede propagarse a periodos sucesivos. El inadecuado tratamiento de estos dos problemas provoca disminución en los ingresos, un impacto negativo en la reputación, un incremento en los costos laborales, y un deterioro en el nivel de servicio ofrecido a los clientes (Kabak et al., 2008).

En un ambiente como el descrito anteriormente, la flexibilidad laboral se vuelve vital para minimizar el descalce entre la oferta y la demanda. Las empresas del sector servicios han empleado estrategias tradicionales para la gestión del personal, como usar turnos de trabajo con diferentes largos y también invertir en sofisticados sistemas de programación de turnos para aprovechar esta flexibilidad. Sin embargo, estas estrategias pueden no ofrecer una ventaja competitiva suficiente, ya que ambas son útiles para tratar la estacionalidad de la demanda, pero no para abordar su incertidumbre. Por otra parte, la literatura reporta que muchos sectores han enfrentado este descalce con personal polifuncional, en el cual un empleado es entrenado para trabajar en diferentes actividades (e.g., Felan et al., 1993; Molleman y Slomp, 1999; Hopp et al., 2004; Simchi-Levi, 2010). Estos empleados no solo proveen flexibilidad para la asignación determinística, sino que también mitigan los efectos negativos del ausentismo no planificado y de la incertidumbre de la demanda (Easton, 2011 y MacVicar et al., 2015). Debido a que las empresas del sector servicios requieren personal con diferentes habilidades para trabajar en diferentes actividades, la polifuncionalidad debería ser útil en este sector. Esta podría ser usada para brindar mayor flexibilidad en el manejo de la estacionalidad de la demanda y también como una medida de contingencia para enfrentar fenómenos no predecibles.

La polifuncionalidad puede ser muy beneficiosa, pero también conlleva un costo. Entrenar empleados para que trabajen en múltiples actividades puede ser muy costoso. Por esta razón, las empresas evitan la polifuncionalidad total, donde todos los empleados son entrenados para trabajar en todas las actividades. Por lo tanto, es relevante identificar diseños eficientes de polifuncionalidad, que aseguren la mayor proporción de los beneficios potenciales a un costo razonable. Muchos autores en diferentes sectores han coincidido en concluir que los empleados con dos habilidades aparecen como la fuerza laboral polifuncional más costo-efectiva (e.g., Felan et al., 1993; Brusco y Johns, 1998; Campbell, 1999; Yang, 2007; Kim y Nembhard, 2010; Simchi-Levi, 2010; Henao et al., 2015). Este tipo de política de flexibilidad parcial es conocida como diseño 2-flexibilidad.

El problema de asignación de personal a diferentes actividades puede ser modelado como un problema de asignación sobre un grafo bipartito donde los nodos de oferta son empleados y los nodos de demanda son actividades. Si el número de recursos siendo asignados es igual al número de recursos siendo requeridos, entonces el sistema es catalogado como balanceado. En un grafo como este, un diseño 2-flexibilidad es conocido como una Cadena Larga Cerrada (CLC) si sus arcos forman exactamente un ciclo no dirigido conteniendo todos los nodos de oferta y demanda (Simchi-Levi y Wei, 2012). Una Cadena Corta Cerrada (CCC) es definida como un sub-grafo bipartito inducido que forma un ciclo no dirigido. Mientras que una Cadena Abierta (CA) es un sub-grafo bipartito inducido que forma un camino no dirigido, es decir, un ciclo no dirigido sin uno de sus arcos.

La Figura 3-1 ilustra las estructuras de polifuncionalidad mencionadas previamente para el caso de sistemas balanceados. En cada estructura los nodos de oferta están ubicados a la izquierda y los nodos de demanda están ubicados a la derecha. En la figura una línea sólida representa la asignación de un recurso especializado y una línea punteada (i.e. arco flexible) la asignación de un recurso polifuncional. Las CLC son preferidas sobre las CCC, ya que ellas pueden adaptarse mejor a una mayor cantidad de escenarios inciertos (e.g., la distribución de la demanda por empleados a través de las actividades es muy diferente de lo esperado). Las CLC han demostrado un desempeño tan bueno como el proporcionado

por la polifuncionalidad total, pero a un costo considerablemente menor. El concepto de CLC fue introducido por Jordan y Graves (1995) en un estudio sobre la producción de automóviles en un sistema balanceado con múltiples plantas.

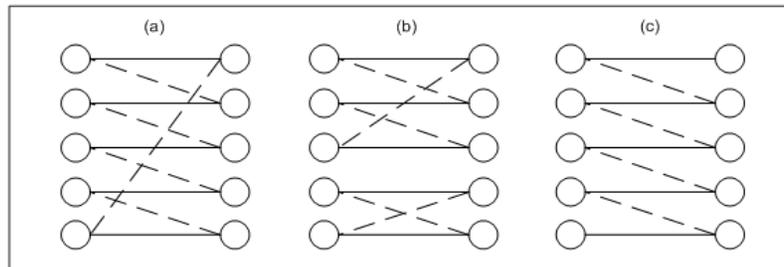


Figura 3-1: Comparación de estructuras de polifuncionalidad: (a) CLC; (b) CCC; (c) CA

Simchi-Levi y Wei (2012), quienes también estudiaron el problema de asignación de productos a plantas en un sistema balanceado, mencionan que existe muy poca teoría para explicar por qué las CLC funcionan tan bien, excepto para sistemas lo suficientemente grandes (Chou et al., 2010). Simchi-Levi y Wei (2012) explican analíticamente la efectividad de las CLC para sistemas finitos y balanceados, considerando demandas estocásticas e independientes. Ellos descubrieron una propiedad fundamental de las CLC, la súper-modularidad, que proporciona una justificación teórica a la idea de “cerrar la cadena,” un concepto que fue observado empíricamente por investigadores tales como Hopp et al. (2004) y Graves (2008). La propiedad de la súper-modularidad permite que los arcos flexibles en una CLC se complementan unos a otros. Es decir, a medida que se añaden nuevos arcos flexibles a una cadena cerrada, también aumentan los beneficios esperados, ya que hay mayores oportunidades de transferir capacidad disponible de aquellas plantas con menor demanda esperada a aquellas plantas con mayor demanda esperada. Esto explica el buen funcionamiento de las CLC.

Adicionalmente, Simchi-Levi y Wei (2012) demostraron que las CLC son óptimas entre todas las configuraciones 2-flexibilidad en sistemas balanceados. También demuestran que varias CCC, donde cada CCC conecta un número sustancial de nodos de oferta y demanda, se desempeñan tan bien como la CLC. Finalmente, aunque Simchi-Levi y Wei (2012)

focalizan su estudio en sistemas balanceados, también agregan que sus resultados deberían ser extensibles a sistemas desbalanceados.

Por otra parte, el problema de asignación del personal en empresas del sector servicios es inherentemente desbalanceado. Haciendo una analogía con sistemas de manufactura, empleados corresponden a plantas, y actividades a productos. Ya que el número de empleados excede significativamente el número de actividades, el desbalance surge. En un sistema como este, una combinación de empleados especializados y polifuncionales debería ser suficiente para absorber la incertidumbre. Además, en lugar de usar una sola CLC, varias cadenas cerradas de diferentes largos podrían aparecer en la solución óptima.

Este trabajo propone una metodología para evaluar los beneficios del encadenamiento en sistemas desbalanceados con demanda incierta. Inicialmente el problema se formula como un Modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MPLEM). El modelo decide de manera simultánea cuáles empleados deben ser entrenados, en qué habilidades, y cómo será su asignación de trabajo en un horizonte de planificación de una semana. Nuestra formulación se diferencia del resto de los trabajos en la literatura, porque las restricciones del MPLEM garantizan un plan de capacitación que entrega la cantidad óptima de empleados polifuncionales por actividad, y simultáneamente garantiza la formación de un conjunto de cadenas cerradas (CLC y/o CCC) que requiere el mínimo número de entrenamientos. Sin embargo, este MPLEM no prioriza la construcción de CLC sobre la construcción de CCC. Posteriormente, a partir de la dotación óptima de empleados polifuncionales entregada por el MPLEM y mediante el uso de una heurística constructiva se genera una solución factible que genera la mínima cantidad de cadenas cerradas. Esta heurística busca aplicar el concepto de CLC en sistemas desbalanceados y también evita resolver un subproblema de vendedor viajero en nuestro MPLEM, que sería necesario resolver si al MPLEM se le exigiera entregar soluciones del tipo CLC. Finalmente, se aborda el MPLEM mediante optimización robusta para incorporar explícitamente la incertidumbre de la demanda. El objetivo de esta metodología es obtener soluciones de polifuncionalidad robustas, esto es, soluciones que provean un buen desempeño para diferentes escenarios de la variabilidad de la demanda.

Existen diferentes enfoques para tratar con la incertidumbre en modelos de optimización: (1) Ignorar la incertidumbre y reemplazar los parámetros aleatorios por “el valor más probable” o por “el valor promedio.” (2) Utilizar un número finito de escenarios y resolver cada uno de ellos de forma independiente. (3) Realizar un análisis de sensibilidad, esto es, medir el impacto sobre el comportamiento de la solución óptima para variaciones (dentro de un rango) en los datos de entrada. El análisis de sensibilidad ayuda a entender cómo puede variar la solución óptima o su comportamiento ante diferentes instancias de la variable estocástica, pero no sugiere una solución que aborde todos los escenarios. (4) Explicitar la incertidumbre (con funciones de distribución de probabilidades conocidas) dentro del modelo, considerando elementos estocásticos en las restricciones y/o la función objetivo. Este enfoque es abordado por el campo de la programación estocástica (Birge y Louveaux, 2011). Sin embargo, el método puede ser impráctico en muchas aplicaciones, ya que el problema puede convertirse fácilmente en un problema intratable; además la distribución probabilística para las variables aleatorias puede ser no conocida o muy difícil de determinar. (5) Usar la Optimización Robusta (OR), un enfoque comparativamente reciente que apunta a identificar soluciones factibles para un amplio rango de escenarios de los parámetros inciertos, utilizando un modelo determinístico de programación matemática. Considera explícitamente la incertidumbre en el modelo de optimización, mientras optimiza una función objetivo de una forma balanceada y controlada respetando la incertidumbre en los parámetros. Este enfoque limita la magnitud de la variabilidad dentro de un rango razonable. Por lo tanto, evita soluciones impulsadas por escenarios extremos y muy improbables. Algunos de los estudios más relevantes sobre OR son Soyster (1973), Mulvey et al. (1995), Ben-Tal y Nemirovski (1998, 1999, 2000), y Bertsimas y Sim (2004).

En este estudio se usó el enfoque de OR originalmente desarrollado por Bertsimas y Sim (2004) para tratar la incertidumbre de la demanda, y posteriormente usamos modificaciones introducidas por los estudios de Bertsimas y Thiele (2006) y Bohle et al. (2010). Se ajustó la restricción de la demanda del MPLEM a la estructura general del paradigma de robustez presentado en Bertsimas y Sim (2004). El MPLEM inicialmente

propuesto fue reformulado como un MPLEM robusto. Finalmente, en este trabajo se presentan los resultados de la implementación de la metodología para un caso de prueba hipotético (pero también realista) para una firma de retail chilena. Se analizó el desempeño del MPLEM robusto para distintos escenarios de variabilidad en la demanda. El propósito fue identificar aquellas estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas cerradas que sean inmunes a la variación de la demanda (dentro de un rango razonable) y que entreguen el mejor desempeño a nivel costo-efectivo. A partir de los resultados obtenidos se busca que los tomadores de decisiones dispongan de políticas de polifuncionalidad efectivas. Estas políticas deben definir un conjunto de reglas simples de decisión que establezcan los patrones de habilidades que deberían adoptar los empleados. Así, este estudio intenta responder dos preguntas fundamentales: cuánta polifuncionalidad agregar y cómo debería ser agregada.

El resto del capítulo está dividido en cinco secciones. La sección 3.2 establece las diferencias entre el problema de polifuncionalidad en el sector servicios versus en el sector manufactura, y posteriormente define el problema estudiado. La sección 3.3 presenta inicialmente el MPLEM propuesto para el problema de asignación de personal semanal con el uso de cadenas cerradas y posteriormente se presenta como complemento la heurística constructiva propuesta. La sección 3.4 presenta inicialmente una breve presentación de enfoques relevantes sobre OR y posteriormente presenta la reformulación matemática robusta del problema estudiado. La sección 3.5 describe los experimentos realizados y los resultados obtenidos. Finalmente, la sección 3.6 presenta las conclusiones de este trabajo y sugerencias para futura investigación.

3.2. Caracterización del problema

En este trabajo estamos interesados en comprender mejor el impacto de estructuras tipo cadenas cerradas (CLC y/o CCC) en la calidad de las soluciones para el problema de programación de personal en el sector servicios. La literatura científica sobre el uso de polifuncionalidad a través de estructuras tipo cadenas se concentra principalmente en el estudio de sistemas balanceados para el sector manufactura (e.g., Jordan y Graves, 1995;

Hopp et al., 2004; Simchi-Levi y Wei, 2012). Sin embargo, como se explicó tempranamente, el problema de programación de personal en empresas del sector servicios es estrictamente desbalanceado y ello exige un análisis más amplio.

En el caso de sistemas desbalanceados, la fuerza laboral podría dividirse en dos grupos: empleados que serán polifuncionales y empleados especializados en una sola actividad. En consecuencia, mientras los empleados especializados son recursos dedicados a una única actividad, los empleados polifuncionales son recursos entrenados en una segunda actividad, que bajo la aplicación del concepto de encadenamiento permitirían vincular grupos de actividades o incluso todas las actividades del sistema a estructuras de asignación tipo cadenas cerradas. En otras palabras, para sistemas desbalanceados surgen dos preguntas: (i) ¿Cuántos empleados en cada actividad del sistema serán polifuncionales? y (ii) ¿Cuántas cadenas cerradas se requieren y qué tipos de largos de cadenas cerradas (CLC, CCC) aparecerán en la solución óptima?

3.2.1. Modelación de la polifuncionalidad

La variable fundamental en un modelo de programación matemática para diseñar una fuerza laboral polifuncional indica si cada empleado será entrenado (o no) para trabajar en cada actividad. Esta fuerza laboral polifuncional podría ser construida bajo tres enfoques: (1) Considerar la polifuncionalidad en la forma más primitiva, como una variable de decisión en el modelo matemático. (2) Asumir que la polifuncionalidad debe ser organizada bajo ciertas estructuras definidas a priori, y el modelo matemático debe responder cuál de esas estructuras se desempeña mejor. (3) Incluir una variable de decisión que determine cuáles empleados serán polifuncionales y en qué habilidades, pero también incorporar un conjunto de restricciones en el modelo matemático que garanticen un plan de capacitación que exija la formación de un conjunto de cadenas cerradas (CLC y/o CCC) con la mínima cantidad de entrenamientos.

En el sector servicios, y en particular para la industria del retail, el primer enfoque fue abordado por Henao et al. (2015). Su modelo decide de manera simultánea cuántos

empleados serán polifuncionales, y qué habilidades deberá adquirir cada uno de ellos. Los autores asumen una fuerza laboral conocida, donde todos sus empleados son inicialmente especializados en una sola actividad. Henao et al. (2015) muestran que la polifuncionalidad total es innecesaria. El mejor desempeño es obtenido con una combinación de empleados especializados y polifuncionales; la mayoría de estos últimos entrenados en una habilidad adicional, aun cuando el costo de capacitación es asumido mínimo. Sin embargo, su modelo no considera incertidumbre en la demanda y tampoco hace un análisis de los beneficios del encadenamiento. En el segundo enfoque, cada empleado es asociado a ciertas actividades, bajo cierta lógica del tomador de decisiones (e.g., tipos de cadenas cerradas). Tal enfoque ha sido ampliamente usado en la literatura por otros autores en varios sectores (e.g., Brusco y Johns, 1998; Inman et al., 2004; Jordan et al., 2004; Iravani et al., 2005). Sin embargo, este tipo de enfoque es a nuestro parecer miope, pues restringe las consideraciones de diseño al definir previamente la cantidad de empleados polifuncionales y también el tipo de cadena cerrada a usar. El presente trabajo aborda de manera novedosa el tercer enfoque. A diferencia de los dos primeros, el enfoque propuesto responde a las preguntas (i) y (ii) sobre polifuncionalidad en sistemas desbalanceados.

3.2.2. Definición del problema

Para un horizonte de planificación semanal, el problema propuesto consiste en asignar horas de trabajo a cada empleado y diseñar un plan de capacitación a una fuerza laboral conocida y que inicialmente está capacitada para trabajar en una sola actividad. Particularmente, en este trabajo estamos interesados en comprender mejor cómo el uso de estructuras tipo cadenas cerradas (CLC y/o CCC) pueden ser beneficiosas para enfrentar una demanda incierta y minimizar los costos de subdotación y sobredotación de personal. Sin pérdida de generalidad, la modelación asumirá el contexto de una tienda de retail donde los empleados podrían ser entrenados para trabajar en un segundo departamento (actividad) convirtiéndose en polifuncionales.

La formulación del problema considera los siguientes supuestos: (1) La demanda semanal por horas para cada departamento es incierta y se asume ausencia de correlación

entre ellas. (2) La demanda para cada departamento puede ser satisfecha parcialmente. Costos de subdotación son por lo tanto incluidos en la función de costo total y corresponden a los costos esperados por ventas perdidas. Se asume que estos costos son iguales por departamento e independientes del nivel de subdotación (i.e., costos de subdotación lineales). (3) Se incorpora también el costo de sobredotación de personal. Mattia et al. (2014) lo considera como un costo “oculto” y su inclusión en la modelación permite cuantificar el costo de oportunidad incurrido al pagar por personal ocioso que podría estar realizando otras tareas productivas para la empresa. También se asume que son iguales por departamento. La incorporación de los costos de subdotación y de sobredotación en la función objetivo también es comúnmente usada en la literatura de problemas de programación de personal (e.g., Segal, 1974; Easton y Rossin, 1996; Van den Bergh et al., 2013; Mattia et al., 2014). (4) El costo de capacitación es incluido en la función de costo total, y se asume que son iguales por departamento. (5) Se asume que el problema de asignación de personal es totalmente equilibrado, es decir, las horas disponibles para ser asignadas en cada departamento son exactamente igual al valor en horas de la demanda media de cada departamento. En consecuencia, la suma de todas las horas disponibles para ser asignadas a través de todos los empleados en la tienda es igual a la suma de las medias del número de horas requeridas en cada departamento. Henao et al. (2015) encontraron que las configuraciones de polifuncionalidad de mínimo costo se obtienen cuando la relación entre la oferta y la demanda total está en equilibrio. (6) No se considera incertidumbre en la oferta, es decir, no hay ausentismo no programado de personal. (7) Todos los empleados tienen igual tipo de contrato, por lo que deben trabajar semanalmente la misma cantidad de horas. (8) Al inicio del horizonte de planificación todos los empleados son especialistas, es decir, entrenados para trabajar en un sólo departamento. (9) La mano de obra es homogénea, es decir, la productividad individual de los empleados es la misma independiente del número departamentos en la que ellos estén entrenados, y del número de ellos que se desempeñen simultáneamente. (10) Dado que los requerimientos de demanda son agregados al máximo (demanda semanal), nosotros asumiremos una naturaleza continua en la variable de asignación de la oferta. Esto supone una relajación lineal del problema de asignación, y permite asignar las horas laborales de

los empleados polifuncionales con total flexibilidad. Finalmente, (11) empleados polifuncionales sólo pueden trabajar en un total de dos departamentos.

3.3. Formulación del modelo

3.3.1. Modelo de optimización

Esta subsección presenta el MPLEM para resolver el problema de asignación de personal con encadenamiento, tal como fue descrito en la sección anterior. Aunque inicialmente se muestra una versión determinística del problema, posteriormente en la subsección 3.4.2 se presentan ajustes que permiten abordar el problema mediante optimización robusta incorporando la incertidumbre de la demanda. Se comienza definiendo los conjuntos del modelo, los parámetros, las variables, y su notación correspondiente.

Conjuntos del modelo:

- I Empleados actuales, indexado en i
- L Departamentos de la tienda, indexado en l
- I_l Dotación de empleados contratados para el departamento l , $I_l \subset I$

Parámetros del modelo:

- c Costo de capacitar a un empleado para trabajar en algún departamento; [\$/sem /Empleado]
- u Costo de subdotación por hora (equivalente al costo esperado por ventas perdidas); [\$/Hora]
- s Costo de sobredotación por hora (equivalente al costo de oportunidad por horas laborales ociosas); [\$/Hora]
- r_l Número de horas requeridas semanales en el departamento l , $\forall l \in L$

- h Cantidad de horas semanales que debe trabajar un empleado de acuerdo a su contrato
- m_i Departamento en el cual el empleado i está entrenado inicialmente, $\forall i \in I$

VARIABLES DE DECISIÓN DEL MODELO:

- x_{il} Igual a 1 si el empleado i es entrenado para trabajar en el departamento l , de otra forma igual a 0, $\forall i \in I, l \in L$
- v_i Igual a 1 si el empleado i es polifuncional, de otra forma igual a 0, $\forall i \in I$
- λ_l Cantidad de empleados polifuncionales pertenecientes al departamento l , $\forall l \in L$
- ω_{il} Cantidad de horas semanales asignadas a trabajar al empleado i en el departamento l , $\forall i \in I, l \in L$
- κ_l Subdotación en horas semanales en el departamento l , $\forall l \in L$
- δ_l Sobredotación en horas semanales en el departamento l , $\forall l \in L$

El modelo determinístico de programación lineal entera mixta es formulado a continuación:

$$\text{Min} \quad \sum_{l \in L} u \kappa_l + \sum_{l \in L} s \delta_l + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L, l \neq m_i} c x_{il} \quad (3.1)$$

(a) (b) (c)

s.a.

$$\sum_{i \in I} \omega_{il} + \kappa_l - \delta_l = r_l \quad \forall l \in L \quad (3.2)$$

$$\sum_{l \in L} \omega_{il} = h \quad \forall i \in I \quad (3.3)$$

$$\omega_{il} \leq h x_{il} \quad \forall i \in I, l \in L \quad (3.4)$$

$$x_{il} = 1 \quad \forall i \in I, l \in L : l = m_i \quad (3.5)$$

$$v_i = \sum_{l \in L : l \neq m_i} x_{il} \quad \forall i \in I \quad (3.6)$$

$$v_i \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (3.7)$$

$$\lambda_l = \sum_{i \in I_l} v_i = \sum_{i \in \{I - I_l\}} x_{il} \quad \forall l \in L \quad (3.8)$$

$$x_{il} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, l \in L \quad (3.9)$$

$$v_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (3.10)$$

$$\lambda_l \geq 0 \quad \forall l \in L \quad (3.11)$$

$$\omega_{il} \geq 0 \quad \forall i \in I, l \in L \quad (3.12)$$

$$\kappa_l \geq 0 \quad \forall l \in L \quad (3.13)$$

$$\delta_l \geq 0 \quad \forall l \in L \quad (3.14)$$

La función objetivo (FO) (3.1) minimiza los siguientes costos semanales: (a) subdotación; (b) sobredotación; y (c) capacitación de empleados en habilidades adicionales. Las restricciones (3.2), (3.13), y (3.14) producen el nivel de sub/sobredotación (no negativo) asociado a cada departamento. Las restricciones (3.3) garantizan que los empleados trabajen exactamente la cantidad de horas semanales exigidas por su contrato. Las restricciones (3.4) aseguran que cada empleado sea asignado a trabajar en un departamento, si y sólo si es entrenado para ese departamento. Las restricciones (3.5) establecen el departamento en el cual está entrenado inicialmente cada empleado. Las restricciones (3.6) indican para cada empleado si este es polifuncional o si continúa siendo especializado. Las restricciones (3.7) aseguran que cada empleado polifuncional esté entrenado en una sola habilidad adicional. Esto garantiza la construcción de un diseño 2-flexibilidad. Notar que dada la naturaleza de las restricciones (3.6) y (3.7), no hay necesidad de declarar las variables v_i como variables binarias. Las restricciones (3.8) aseguran para cada departamento l , que exista igualdad entre la cantidad de empleados propios del departamento l que son entrenados para trabajar en otros departamentos de la

tienda $\left(\lambda_l = \sum_{i \in I_l} v_i\right)$ y la cantidad de empleados pertenecientes a otros departamentos que recíprocamente son entrenados para trabajar en el departamento l $\left(\sum_{i \in \{I-I_l\}} x_{il}\right)$. Las restricciones (3.7) y (3.8) garantizan la formación de cadenas cerradas tipo CLC o CCC. La formación de cualquier cadena cerrada exige que el grado de entrada de cada nodo de oferta que pertenezca a ella, sea igual al grado de salida de su respectivo nodo de demanda. El cumplimiento de esta condición es garantizado por las restricciones (3.8). Finalmente, las restricciones (3.9) – (3.14) definen el dominio de cada variable del problema.

Varios autores aseguran que las CLC son preferidas sobre las CCC, ya que ellas pueden adaptarse mejor a una mayor cantidad de escenarios inciertos (e.g., Jordan y Graves, 1995; Simchi-Levi y Wei, 2012). Sin embargo, aunque el término (c) en la FO (3.1) y las restricciones (3.7) y (3.8) garantizan la construcción de un conjunto de cadenas cerradas que requiere la mínima cantidad de entrenamientos (i.e., arcos flexibles), esta formulación no incluye restricciones que beneficien la formación de CLC sobre la formación de CCC. Esto implica que nuestro MPLEM aunque es más simple puede ser catalogado como incompleto. Construir un modelo matemático que priorice la construcción de CLC sobre las CCC exige agregar una nueva familia de variables y restricciones, las cuales están asociadas a la formulación de un problema de vendedor viajero. Esta nueva formulación volvería el problema tipo NP-completo y lo haría extremadamente difícil de resolver. Alternativamente, para mantener la simpleza del modelo se opta por desarrollar una heurística constructiva que mediante la solución del MPLEM propuesto genere un conjunto factible de cadenas cerradas que priorice la formación de CLC sobre las CCC.

3.3.2. Heurística constructiva

Esta subsección propone una heurística constructiva que replique el concepto de CLC para minimizar el número de cadenas cerradas en un sistema desbalanceado. Esta heurística usa como input la dotación óptima de empleados polifuncionales entregada por el MPLEM. El objetivo es determinar en qué departamento adicional va a ser entrenado cada empleado polifuncional identificado por la solución del MPLEM, mientras se

construye la mínima cantidad de cadenas cerradas. Aunque esta heurística explora un espacio muy reducido del conjunto de cadenas cerradas posibles de construir, la estrategia aquí, es que dada la gran cantidad de cadenas existentes, es posible alcanzar un buen nivel de desempeño usando sólo las cadenas más directas e intuitivas de construir. Brusco y Johns (1998) explican que hay múltiples soluciones al problema de selección de las estructuras de polifuncionalidad óptimas. Este resultado indica que bajo un enfoque heurístico podríamos construir de manera más simple (i.e., sin tener que resolver un problema de vendedor viajero) estructuras de polifuncionalidad que logren un buen desempeño del sistema. El Algoritmo 1 (A-CLC) presenta y explica brevemente cada una de las etapas que conforman la heurística propuesta. La notación matemática usada en el algoritmo es presentada a continuación:

Entradas:

- L Conjunto de departamentos, indizado por l
- R Conjunto de empleados polifuncionales, indizado por i (resultado del MPLEM)
- λ_l^* Cantidad óptima de empleados polifuncionales que pertenecen al departamento l , $\forall l \in L$, (resultado del MPLEM)
- μ_l Media de la demanda semanal del departamento l , $\forall l \in L$
- σ_l Desviación de la demanda semanal del departamento l , $\forall l \in L$
- CV_l Coeficiente de variación de la demanda semanal del departamento l , tal que $CV_l = \sigma_l / \mu_l$, $\forall l \in L$

Resultados:

- f_{ilk} Igual a 1 si el empleado polifuncional i del departamento l es entrenado para trabajar en el departamento k , de otra forma igual a 0; $\forall i \in R$ y $\forall l, k \in L: l \neq k$

Ω : Cantidad de cadenas generadas

Algoritmo 1: Rutina para generar cadenas largas cerradas (A-CLC)

Fase 1: Inicialización

Paso 1: Ingresar información del algoritmo: $\lambda_l^*, \mu_l, CV_l, \forall l \in L$

Fase 2: Generación de CLC

Paso 2: Tomar los empleados polifuncionales de cada departamento de la tienda y formar una colección S de subconjuntos. Cada conjunto $s \in S$ debe satisfacer las siguientes reglas:

- a. Contener la mayor cantidad posible de empleados polifuncionales. Pero no puede contener más de un empleado polifuncional del mismo departamento.
- b. $\sum_{s \in S} |s| = \sum_{l \in L} \lambda_l^*$. Garantiza que el conjunto de CLC construidas usen todo el personal polifuncional requerido por la solución del MPLEM.

Paso 3: Construir una CLC con cada conjunto $s \in S$. Se deben satisfacer las siguientes políticas simples.

- a. Para cada CLC crear arcos de entrenamiento (f_{ilk}) entre los departamentos con mayor CV . Si se asume que $CV_l = CV_k \forall l, k \in L : l \neq k$, en la CLC crear arcos de entrenamiento (f_{ilk}) entre los departamentos con mayor μ .
- b. En la medida de lo posible evitar repetir arcos de entrenamiento entre las CLC. Es decir, se trata de evitar que empleados polifuncionales pertenecientes a un departamento dado sean entrenados para trabajar en el mismo departamento adicional. En otras palabras, evitar $f_{ilk} = f_{jih}, \forall i, j \in R : i \neq j$ y $\forall l, k, h \in L : k = h$.

Fase 3: Término

Paso 4: Retornar Ω y $f_{ilk}, \forall i \in R$ y $\forall l, k \in L : l \neq k$.

3.4. Optimización robusta

Esta sección presenta inicialmente una breve descripción de algunos enfoques relevantes sobre OR, concentrándose principalmente en el enfoque de OR propuesto por Bertsimas y Sim (2004). Posteriormente presenta la reformulación robusta del MPLEM presentado previamente.

3.4.1. Enfoque de optimización robusta

Existe una extensa literatura sobre trabajos que han usado el enfoque de OR en varios tipos de problemas. Para una exhaustiva revisión de literatura referimos a Beyer y Sendhoff (2007), Kouvelis y Yu (2013), y Gabrel et al. (2014). En sus inicios, la forma más simple de usar el enfoque de OR fue adoptar la solución del peor caso (Soyster, 1973). Este enfoque, sin embargo, puede ser muy criticado porque conduce a soluciones demasiado conservadoras y costosas. Posteriormente, Mulvey et al. (1995) sugirieron abordar problemas estocásticos en los cuales las soluciones deben ser factibles para un conjunto discreto de escenarios probabilísticos, optimizando un valor esperado en la función objetivo. Sin embargo, este enfoque requiere total conocimiento de las probabilidades asociadas a cada escenario, lo cual no siempre está disponible. Un desarrollo en OR emergió del trabajo de Ben-Tal y Nemirovski (1998, 1999, 2000). Ellos establecieron una solución robusta para problemas lineales en el cual cada parámetro con incertidumbre está dentro de un conjunto convexo acotado, sin necesidad de especificar las probabilidades asociadas a cada escenario. Este enfoque evita potencialmente soluciones en el escenario del peor caso. Sin embargo, dependiendo del conjunto de incertidumbre definido para el parámetro incierto, se puede conducir a obtener modelos robustos no lineales. Modelos que son mucho más difíciles de resolver. Posteriormente, Bertsimas y Sim (2004) presentan una investigación en que se trabaja con el valor promedio o nominal del parámetro con incertidumbre y los límites inferior y superior de tal parámetro.

A continuación se describirá el enfoque de OR propuesto por Bertsimas y Sim (2004) y en el cual se basa este trabajo. Para ello nos apoyamos en la descripción hecha por el trabajo de Varas et al. (2014). Consideremos un problema general de programación lineal:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \quad c^T x \\ & \text{s.a.} \quad a_i^T x \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m \\ & \quad \quad x \geq 0 \end{aligned}$$

Sea A la matriz de restricciones formada con los vectores fila a_i^T , $i=1, \dots, m$. Sin pérdida de generalidad, se puede asumir que las incertidumbres sólo afectan a los elementos en la matriz A . Si hay incertidumbre sobre b_i , una nueva variable x_{n+1} puede ser introducida dentro del modelo, y la restricción asociada con el parámetro incierto puede ser reescrita como $a_i^T x - x_{n+1} b_i \leq 0$, con $x_{n+1} = 1$, por lo cual b_i es incluido en la matriz A (Bertsimas y Sim, 2003). También se define J_i como el conjunto de coeficientes en la fila i de la matriz A que están sujetos a incertidumbre. Cada coeficiente a_{ij} , $j \in J_i$, es modelado como una variable \tilde{a}_{ij} acotada, independiente, y simétrica, que toma valores en el intervalo $[\bar{a}_{ij} - \hat{a}_{ij}, \bar{a}_{ij} + \hat{a}_{ij}]$. Posteriormente se define la desviación escala del parámetro a_{ij} a partir de su valor nominal \bar{a}_{ij} , esto es $z_{ij} = (\tilde{a}_{ij} - \bar{a}_{ij}) / \hat{a}_{ij}$, donde $|z_{ij}| \leq 1$.

Varias nociones importantes detrás del enfoque de Bertsimas y Sim deben ser destacadas. Una de ellas es la introducción de un parámetro que pueda ser usado para controlar el nivel de conservatismo de la solución robusta. Para cada restricción i , un umbral $\Gamma_i \in [0, |J_i|]$ (no necesariamente un valor entero) puede acotar la desviación escala total de los parámetros inciertos, esto es: $\sum_{j \in J_i} |z_{ij}| \leq \Gamma_i$, $\forall i$. La elección de un particular presupuesto de incertidumbre Γ_i , permitirá al tomador de decisiones evaluar el trade-off entre la robustez y desempeño de las soluciones de acuerdo a su aversión al riesgo. Otras dos nociones importantes son la definición de los conjuntos de incertidumbre y la obtención de la contraparte robusta a partir del modelo original. La incertidumbre en la data es descrita a través de conjuntos determinísticos (típicamente convexos y acotados). Cada conjunto contiene la mayoría o todos los posibles valores que pueden tomar los parámetros inciertos. En particular, el conjunto de incertidumbre en el enfoque de Bertsimas y Sim está dado por:

$$U = \left\{ A \in \mathbb{R}^{m \times n} : \tilde{a}_{ij} = \bar{a}_{ij} + z_{ij} \hat{a}_{ij}, \forall i, j; \sum_{j \in J_i} |z_{ij}| \leq \Gamma_i, \forall i; |z_{ij}| \leq 1 \quad \forall i, j \right\}$$

En consecuencia el problema de programación lineal considerado previamente queda definido como:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \quad c^T x \\ & \text{s.a.} \quad Ax \leq b, \quad \forall A \in U \\ & \quad \quad x \geq 0 \end{aligned}$$

La contraparte robusta se define entonces como el problema determinístico asociado con la incertidumbre de este nuevo problema. Dependiendo del conjunto de incertidumbre usado, diferentes contrapartes robustas con diferentes niveles de tratabilidad pueden ser obtenidas. En el caso que concierne, la contraparte robusta es construida maximizando el lado izquierdo de las restricciones sobre el conjunto de desviaciones escalas admisibles. Esto puede ser representado como una función de protección para cada restricción incierta. Esto conduce el siguiente problema:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \quad c^T x \\ & \text{s.a.} \quad \bar{a}_i^T x + \beta_i(x, \Gamma_i) \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m \\ & \quad \quad x \geq 0 \end{aligned}$$

Donde \bar{a}_i^T denota la data nominal para la fila i y la función de protección para cada restricción i está dado por:

$$\begin{aligned} \beta_i(x, \Gamma_i) &= \text{Max} \quad \sum_{j \in J_i} |x_j| \hat{a}_{ij} z_{ij} \\ & \text{s.a.} \quad \sum_{j \in J_i} z_{ij} \leq \Gamma_i \\ & \quad \quad 0 \leq z_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in J_i \end{aligned}$$

Por dualidad fuerte (Ver Teorema 1 de Bertsimas y Sim (2004)), este problema es equivalente a la siguiente formulación lineal:

$$\begin{aligned}
& \text{Min} && c^T x \\
& \text{s.a.} && \bar{a}_i^T x + z_i \Gamma_i + \sum_{j \in J_i} q_{ij} \leq b_i && \forall i \\
& && z_i + q_{ij} \geq \hat{a}_{ij} y_j && \forall i, j \in J_i \\
& && -y_j \leq x_j \leq y_j && \forall j \\
& && q_{ij} \geq 0 && \forall i, j \in J_i \\
& && z_i, y_j, x_j \geq 0 && \forall i, j
\end{aligned}$$

Donde las variables z_i y q_{ij} son las variables duales de las restricciones pertenecientes a la función de protección. La principal ventaja de esta formulación robusta es que conserva la linealidad del modelo original. Esta característica conduce a modelos de optimización más tratables computacionalmente.

3.4.2. Reformulación robusta

Para considerar la incertidumbre del parámetro de demanda, el MPLEM determinístico presentado en la subsección 3.3.1 debe ser reformulado. La metodología de OR asume que el parámetro incierto tiene un valor nominal \bar{r}_i , y una variación máxima permitida, \hat{r}_i , expresada como una fracción del valor nominal. Nosotros modelamos la demanda por horas hombre \tilde{r}_i como una variable aleatoria acotada que toma valores en el siguiente intervalo $[\bar{r}_i - \hat{r}_i, \bar{r}_i + \hat{r}_i]$. La desviación escala del parámetro r_i es definida a partir de su valor nominal \bar{r}_i , esto es $z_i = (\tilde{r}_i - \bar{r}_i) / \hat{r}_i$, donde $|z_i| \leq 1$. Las restricciones (3.2) en el modelo original son las únicas afectadas por la incertidumbre del parámetro de demanda. Para que el enfoque de OR pueda considerar realizaciones de la demanda por debajo y por encima de su valor nominal, se deben hacer algunos cambios en el modelo determinístico presentado previamente. Basándonos en el trabajo de Bertsimas y Thiele (2006), quienes abordaron una restricción de demanda con una estructura similar a la nuestra, la FO (3.1) y las restricciones (3.2) pueden ser reemplazadas por la siguiente formulación equivalente:

$$\text{Min} \quad \sum_{l \in L} \psi_l + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L: l \neq m_i} cx_{il} \quad (3.15)$$

$$\psi_l \geq s \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l \right) \quad \forall l \in L \quad (3.16)$$

$$\psi_l \geq -u \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l \right) \quad \forall l \in L \quad (3.17)$$

La variable ψ_l representa el costo total de sobre/subdotación en el departamento l . En consecuencia, las restricciones (3.16) y (3.17) son ahora las únicas afectadas por la incertidumbre del parámetro de demanda. El problema con estas restricciones, es que de la forma en que están escritas no se ajustan a la estructura general del paradigma robusto presentado por Bertsimas y Sim (2004). Es decir, hay un único parámetro incierto en cada restricción y por lo tanto la única robustez que puede ser construida en esta situación, siguiendo la construcción estándar, es tomar el peor valor posible del parámetro en todas las restricciones (3.16) – (3.17).

Bohle et al. (2010) explican que esta situación puede ser demasiado conservadora, ya que es muy poco probable que las demandas de todos los departamentos estén en el peor caso simultáneamente. Esto es equivalente al peor de los escenarios. Sin embargo, aun hace sentido hallar una solución robusta que evite este improbable peor caso. Para lograr esto, nosotros nos basamos en el enfoque modificado de OR desarrollado por Bohle et al. (2010). Ellos usaron una formulación robusta práctica para apoyar las decisiones de la cosecha de uva en la industria del vino. En su modelación el parámetro incierto fue la productividad laboral de los empleados. Ellos propusieron introducir una restricción redundante en el modelo determinístico y posteriormente aplicar la transformación robusta estándar. También añaden una protección extra a las restricciones (3.16) – (3.17). En ese sentido, su enfoque es heurístico, pero ofrece soluciones que se comportan bien en términos de factibilidad esperada y conservatismo del valor objetivo.

Antes de aplicar el enfoque modificado de Bohle et al. (2010) hay que tener en cuenta la siguiente situación. Cualquier demanda por departamento puede estar sujeta a incertidumbre, pero en la práctica, no necesariamente todas las demandas tienen que variar

simultáneamente. Por esta razón, es posible incorporar en la formulación robusta el conjunto J , el cual define el conjunto de departamentos que están sujetos a incertidumbre simultáneamente. En este trabajo nosotros estamos interesados en estudiar una situación donde los requerimientos de personal en todos los departamentos de la tienda están sujetos a incertidumbre simultáneamente. Es decir, nosotros asumimos $|J|=|L|$. En consecuencia, todas las restricciones (3.16) – (3.17) son afectadas por la incertidumbre en el parámetro de la demanda, y son reformuladas de la siguiente forma. Notar que si $|J|<|L|$ las modificaciones son obvias.

$$\psi_l \geq s \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l \right) \quad \forall l \in J \quad (3.18)$$

$$\psi_l \geq -u \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l \right) \quad \forall l \in J \quad (3.19)$$

Bajo el enfoque de Bohle et al. (2010), el parámetro de presupuesto de incertidumbre se expresará como una fracción, $0 \leq \Gamma \leq 1$, del número total de parámetros inciertos, esto es β . En nuestro caso $\beta = |J|$. El parámetro Γ es el nivel de conservatismo o un “presupuesto de incertidumbre” para las restricciones (3.18) – (3.19). Si $\Gamma = 0$, nosotros estamos en el caso determinístico, donde no se considera la incertidumbre. Por otro lado, $\Gamma = 1$ es el mayor nivel de protección para las restricciones y representa el escenario del peor caso. Es decir, el escenario que considera la máxima incertidumbre posible en el problema. Bajo estos supuestos, y siguiendo los enfoques de Bertsimas y Sim (2004) y Bohle et al. (2010), el conjunto de incertidumbre para el parámetro r_l queda expresada como:

$$U = \left\{ \tilde{r}_l, l \in J : \tilde{r}_l = \bar{r}_l + z_l \hat{r}_l, \forall l; \sum_{l \in J} |z_l| \leq \Gamma \beta, \forall l; |z_l| \leq 1 \quad \forall l \right\} \quad (3.20)$$

Nosotros comenzamos la reformulación robusta incorporando al problema original las restricciones agregadas y redundantes (3.21) – (3.22). Estas restricciones se obtienen al sumar las restricciones (3.18) y sumar las restricciones (3.19), respectivamente.

$$\sum_{l \in J} \psi_l \geq \sum_{l \in J} s \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l \right) \quad (3.21)$$

$$\sum_{l \in J} \psi_l \geq -\sum_{l \in J} u \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l \right) \quad (3.22)$$

Las restricciones agregadas (3.21) – (3.22), aunque pueden ser redundantes, se utilizan para aplicar el enfoque original de Bertsimas y Sim (2004) tal como sigue:

$$\sum_{l \in J} \psi_l \geq \sum_{l \in J} s \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l + \Gamma \beta z + q_l \right) \quad (3.23)$$

$$\sum_{l \in J} \psi_l \geq -\sum_{l \in J} u \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l - \Gamma \beta z - q_l \right) \quad (3.24)$$

$$z + q_l \geq \hat{r}_l \quad \forall l \in J \quad (3.25)$$

$$z \geq 0 \quad (3.26)$$

$$q_l \geq 0 \quad \forall l \in J \quad (3.27)$$

Las restricciones (3.23) - (3.24) corresponden a la contraparte robusta obtenida a través de la metodología de OR. En esta formulación, q_l, z son las variables duales auxiliares usadas en la formulación robusta. Las restricciones (3.25) permiten controlar la variación de los parámetros r_l dentro un rango permitido. Bohle et al. (2010) explican que este grupo de restricciones robustas, incluso con $\Gamma = 1$, puede no entregar una solución factible para todas las posibles realizaciones del parámetro incierto, ya que la robustez es aplicada sobre restricciones agregadas. Para sobrellevar este inconveniente, ellos proponen una contraparte robusta modificada, la cual incorpora parte de la información dual contenida en las variables q_l y z dentro las restricciones (3.18) – (3.19). Este estudio propone utilizar la siguiente versión robusta de las restricciones (3.18) – (3.19):

$$\psi_l \geq s \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l + \Gamma z + q_l \right) \quad \forall l \in J \quad (3.28)$$

$$\psi_l \geq -u \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l - \Gamma z - q_l \right) \quad \forall l \in J \quad (3.29)$$

Las restricciones (3.28) – (3.29) pueden ser interpretadas como “desagregadas” de las restricciones robustas (3.23) y (3.24) respectivamente. Esta acción generará una protección sobre las restricciones (3.18) – (3.19), protección que está correlacionada con la protección determinada para las restricciones agregadas (3.23) – (3.24), y para las cuales sólo una fracción del presupuesto de incertidumbre es aplicada.

El modelo robusto de programación lineal entera mixta es presentado a continuación:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \quad \sum_{l \in L} \psi_l + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L: l \neq m_i} cx_{il} \\
 & \text{s.a.} \\
 & \sum_{l \in J} \psi_l \geq \sum_{l \in J} s \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l + \Gamma \beta z + q_l \right) \\
 & \sum_{l \in J} \psi_l \geq - \sum_{l \in J} u \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l - \Gamma \beta z - q_l \right) \\
 & \psi_l \geq s \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l + \Gamma z + q_l \right) \quad \forall l \in J \\
 & \psi_l \geq -u \left(\sum_{i \in I} \omega_{il} - \bar{r}_l - \Gamma z - q_l \right) \quad \forall l \in J \\
 & z + q_l \geq \hat{r}_l \quad \forall l \in J \\
 & \sum_{l \in L} \omega_{il} = h \quad \forall i \in I \\
 & \omega_{il} \leq hx_{il} \quad \forall i \in I, l \in L \\
 & x_{il} = 1 \quad \forall i \in I, l \in L: l = m_i \\
 & v_i = \sum_{l \in L: l \neq m_i} x_{il} \quad \forall i \in I \\
 & v_i \leq 1 \quad \forall i \in I \\
 & \lambda_l = \sum_{i \in I_l} v_i = \sum_{i \in \{I - I_l\}} x_{il} \quad \forall l \in L \\
 & x_{il} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, l \in L \\
 & v_i \geq 0 \quad \forall i \in I \\
 & \lambda_l \geq 0 \quad \forall l \in L
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{il} &\geq 0 && \forall i \in I, l \in L \\ z &\geq 0 \\ q_l &\geq 0 && \forall l \in J \end{aligned}$$

3.5. Resultados y discusión

Esta sección describe los escenarios definidos y experimentos realizados para evaluar el desempeño de las soluciones robustas entregadas por el MPLEM robusto y la heurística constructiva propuesta. La metodología propuesta fue aplicada sobre un caso de prueba hipotético pero realista a una tienda de Mejoramiento del Hogar en la ciudad de Santiago de Chile. El MPLEM robusto fue escrito en AMPL y resuelto utilizando el software comercial ILOG CPLEX 12.4.0.1 ejecutándose en un PC Intel Core i5-2430M 2.4 GHz y 4.0 GB de RAM.

Todas las pruebas comparten las siguientes características:

1. Los parámetros de costo y las demandas por requerimientos de personal en cada departamento fueron obtenidos a partir de información real suministrada por la tienda de retail.
2. Los requerimientos de personal en todos los departamentos de la tienda están sujetos a incertidumbre simultáneamente. Es decir, nosotros asumimos $|J|=|L|$.
3. La demanda semanal por horas hombres en cada departamento de la tienda tiene media \bar{r}_l y desviación estándar $\sigma_l = \alpha \bar{r}_l$, $\forall l \in L$. Bajo el enfoque de OR, α es el nivel de variabilidad, tal que $0 \leq \alpha \leq 1$. Luego, la máxima variación permitida es expresada como $\hat{r}_l = 2\sigma_l$, $\forall l \in L$. En consecuencia, la demanda de un departamento pertenece al intervalo $[\bar{r}_l - 2\alpha\bar{r}_l, \bar{r}_l + 2\alpha\bar{r}_l]$. La configuración de este intervalo es análoga a una distribución normal con un 95% de cobertura.

4. Se considera un sólo tipo de contrato de trabajo: empleados full-time que trabajan 45 horas semanales (FT45).
5. Inicialmente cada empleado es especialista y por lo tanto sólo está entrenado para trabajar en un departamento de la tienda.

Con el objeto de identificar aquellas instancias o soluciones robustas con mejor desempeño costo-efectivo, se realiza una comparación de los resultados obtenidos. Cada instancia está definida por la combinación del nivel de variabilidad de la demanda (α) y el nivel de conservatismo (Γ). Para realizar esta comparación, el análisis se centra en torno a métricas de desempeño que califican los costos incurridos y la inversión en polifuncionalidad requerida por cada solución robusta. Las métricas utilizadas son las siguientes:

Costo total promedio semanal por instancia.

$$\bar{\varphi} = \sum_{l \in L} \psi_l + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L: l \neq m_i} cx_{il}$$

Ahorro porcentual en el costo promedio de sub/sobredotación semanal por instancia. Sea $\bar{\psi}$, el costo promedio de sub/sobredotación semanal obtenido en la solución de una instancia cualquiera. Por otra parte, $\bar{\psi}_{CP}$ es equivalente al costo promedio de sub/sobredotación semanal obtenido cuando no hay inversión en polifuncionalidad y por lo tanto la dotación de la tienda es totalmente especializada. De manera análoga, $\bar{\psi}_{PT}$ es equivalente al costo promedio de sub/sobredotación semanal obtenido cuando todos los empleados están entrenados para trabajar en cualquier departamento de la tienda. En consecuencia, la diferencia $(\bar{\psi}_{CP} - \bar{\psi}_{PT})$, representa la máxima disminución posible en el costo promedio de sub/sobredotación, que es obtenida al invertir en polifuncionalidad total. Definiremos el ahorro porcentual obtenido por la solución de una instancia como:

$$\% SSA = \frac{\bar{\psi}_{CP} - \bar{\psi}}{\bar{\psi}_{CP} - \bar{\psi}_{PT}} \cdot 100$$

Porcentaje de empleados polifuncionales por instancia. Es decir, el número de empleados polifuncionales usados en la solución de la instancia en relación al número total de empleados de la tienda.

$$\% EP = \frac{\sum_{l \in L} \lambda_l}{|I|} \cdot 100$$

Porcentaje de polifuncionalidad total por instancia. Este indicador calcula el número de habilidades adicionales entrenadas en la solución de la instancia en relación a la cantidad máxima teórica posible.

$$\% PT = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{l \in L: l \neq m_i} x_{il}}{|I| \cdot (|L| - 1)} \cdot 100$$

3.5.1. Escenarios

La principal motivación de usar OR es alcanzar un buen trade-off entre el nivel de conservatismo de la solución robusta y la pérdida de optimalidad. De hecho, una solución robusta es inmune a cambios en los parámetros inciertos dentro de cierto rango, pero sujeta a una posible pérdida de optimalidad. En nuestro trabajo, nosotros estamos interesados en evaluar y medir el beneficio del encadenamiento ante diferentes escenarios de incertidumbre en el parámetro de demanda, y a partir de allí, construir políticas que respondan a dos preguntas fundamentales sobre polifuncionalidad: cuánta agregar y cómo agregarla. Para ello consideramos 6 niveles de variabilidad para cada demanda por departamento. Esto significa que nosotros usamos $\alpha = 5\%$, 10% , 20% , 30% , 40% , y 50% . Sin embargo, también usamos simulación Montecarlo para analizar el desempeño promedio de las soluciones robustas y proveer lineamientos de cómo elegir un apropiado nivel de conservatismo o presupuesto de incertidumbre (Γ). El valor de Γ fue normalizado para variar de 0 a 1 en pasos de 0.1, lo cual genera 11 instancias del problema.

Cada una de estas instancias fue resuelta para los 6 niveles de variabilidad de la demanda (5%, 10%, 20%, 30%, 40%, y 50%), resultando en 66 soluciones robustas. En consecuencia, en cada una de las 66 instancias del problema todos los departamentos de la tienda tienen el mismo nivel de variabilidad y el mismo nivel de conservatismo. Recordar que $\Gamma = 0$ es equivalente a la ausencia de incertidumbre, es decir, representa el caso nominal o determinístico. Por otra parte, $\Gamma = 1$ es equivalente al más alto nivel de protección para la satisfacción de la restricción de cobertura de la demanda. Luego $\Gamma = 1$ representa el escenario del “*peor caso*.” Adicionalmente dado que asumimos que $|J| = |L|$, este escenario supone el máximo posible de incertidumbre y la solución más conservadora del problema.

Nosotros consideramos una versión simplificada de una tienda que cuenta con 6 departamentos y 30 empleados, tal que $|L| = 6$ y $|I| = 30$. Sea n_l la dotación semanal en horas del departamento l , $\forall l \in L$. Para el departamento 1 (D1), los parámetros son $n_1 = \bar{r}_1 = 315$ (i.e., siete empleados), mientras que para el resto de ellos son los siguientes: (D2), $n_2 = \bar{r}_2 = 225$; (D3), $n_3 = \bar{r}_3 = 135$; (D4), $n_4 = \bar{r}_4 = 135$; (D5), $n_5 = \bar{r}_5 = 180$; y (D6), $n_6 = \bar{r}_6 = 360$. Nuestra metodología asume que $n_l = \bar{r}_l$, $\forall l \in L$. Es decir, un problema de asignación de personal que inicialmente está totalmente equilibrado. Este supuesto implica que si resolvemos el problema robusto en ausencia de incertidumbre, es decir con $\Gamma = 0$, no se entrenará a ningún empleado pues no hay subdotación ni sobredotación de personal.

En cuanto a la estructura de costos considerada, se asumió un costo mínimo de capacitar a un empleado ($c = US\$1 - sem / empleado$) e igual para todos los departamentos. Esto permite interpretar el resultado como una cota máxima para el potencial de la polifuncionalidad en el desempeño de la tienda. Se consideró un costo de subdotación de $u = US\$60 / hora$ y un costo de sobredotación es $s = US\$15 / hora$. En su trabajo y de manera análogo al nuestro, Bertsimas y Thiele (2006) explican que la relación entre los costos u y s define el comportamiento que tomará la variable aleatoria acotada \tilde{r}_l en el intervalo

$[\bar{r}_l - \hat{r}_l, \bar{r}_l + \hat{r}_l]$. Por definición, si se parte de una situación de equilibrio como la nuestra, tal que $n_l = \bar{r}_l, \forall l \in L$; el modelo genera un caso donde \tilde{r}_l pertenecerá al intervalo $[\bar{r}_l, \bar{r}_l + \frac{u-s}{u+s} \hat{r}_l]$ si $u \geq s$ y \tilde{r}_l pertenecerá al intervalo $[\bar{r}_l + \frac{u-s}{u+s} \hat{r}_l, \bar{r}_l]$ si $u < s$. El caso extremo es $u = s$, donde $\tilde{r}_l = \bar{r}_l, \forall l \in L$.

Es decir, independiente de la combinación de α y Γ , si $u \geq s$ entonces el modelo genera un caso donde \tilde{r}_l será más grande que \bar{r}_l para cada departamento de la tienda. Esto es equivalente a una situación donde todos los departamentos están subdotados, ya que la demanda de cada departamento supera su propia dotación de empleados. De manera análoga, si $u < s$ entonces \tilde{r}_l será más pequeño que \bar{r}_l para cada departamento de la tienda. Esto es equivalente a resolver un problema donde no hay presencia de subdotación en ningún departamento, ya que la demanda de cada departamento es inferior a su propia dotación de empleados. En ambos casos agregar polifuncionalidad no tiene valor, pues esta es especialmente útil en escenarios donde hay desbalance entre la oferta y la demanda esperada, y hay oportunidades de transferir capacidad disponible de aquellos departamentos con menor demanda esperada a aquellos departamentos con mayor demanda esperada.

De esta forma, la demanda \tilde{r}_l puede tomar valores en dos posibles escenarios. Nosotros denominamos el escenario Sube (S) por la relación $u \geq s$ y el escenario Baja (B) por la relación $u < s$. Por lo tanto, si tenemos una tienda con 6 departamentos hay $2^6 = 64$ distintas combinaciones que pueden tomar las demandas por departamento. Adicionalmente, estas 64 combinaciones pueden dividirse y agruparse en 7 estructuras de demanda. El número de combinaciones posibles para cada estructura de demanda se puede obtener a partir de la siguiente expresión: $C(6, k) = (6!) / ((6-k)!k!)$, donde k corresponde al número de demandas que están en el escenario S, tal que $k = 0, 1, 2, \dots, 6$. Para hacer el análisis con OR nosotros elegimos la estructura de demanda con $k = 3$, tal que $C(6, 3) = 20$. Esta estructura agrupa la mayor cantidad de combinaciones y también

corresponde a la situación más atractiva para invertir en polifuncionalidad, pues es la que permite mayores oportunidades de transferir empleados polifuncionales. En consecuencia, nuestros resultados pueden interpretarse como una cota máxima del nivel de polifuncionalidad requerido en la tienda. En resumen, en las 66 instancias del problema robusto nosotros consideramos una situación donde en la mitad de los departamentos domina el costo de subdotación y en la otra mitad domina el costo de sobredotación.

Los resultados y discusión del caso de estudio están divididos en tres subsecciones: (3.5.2) ¿Cuánta polifuncionalidad agregar?; (3.5.3) ¿Cómo agregar la polifuncionalidad?; y (3.5.4) Análisis de desempeño.

3.5.2. ¿Cuánta polifuncionalidad agregar?

En esta subsección se resuelve el MPLEM robusto para cada una de las 66 instancias del problema. El MPLEM robusto genera un problema con 254 restricciones y 397 variables, de las cuales hay 150 variables binarias. Las instancias del problema son resueltas a optimalidad y en menos de 20 segundos cada una de ellas (a través de iteraciones simplex dual). El objetivo de esta subsección es determinar la cantidad óptima de empleados polifuncionales para cada departamento de la tienda (λ_l^*), según sea la combinación del nivel de variabilidad de la demanda (α) y el nivel de conservatismo (Γ). Los resultados para las 66 instancias son recopilados en la Tabla 3-1. La Tabla 3-1 muestra como la cantidad total de empleados polifuncionales de la tienda ($\sum_{l \in L} \lambda_l^*$) aumenta gradualmente a medida que aumenta el nivel de variabilidad (α) y el nivel de conservatismo (Γ). Recordar que $\hat{r}_l = 2\alpha\bar{r}_l$, $\forall l \in L$. Notar que para instancias con $\Gamma = 0$, el cual corresponde al caso nominal, es obvio que $\lambda_l^* = 0$, $\forall l \in L$. Adicionalmente, las soluciones obtenidas en relación a las instancias con un nivel de variabilidad bajo (i.e., $\alpha = 5\%$), mostraron que aun cuando el costo de capacitación es prácticamente gratis (i.e., $c = 1$), se requiere solamente un empleado polifuncional por departamento entrenado en una habilidad

adicional para minimizar el costo total. Es decir, $\lambda_l^* = 1, \forall l \in L$. Este resultado puede interpretarse como la mínima inversión requerida en polifuncionalidad.

Tabla 3-1: Cantidad óptima de empleados polifuncionales de la tienda para cada instancia

| | | Γ | | | | | | | | | | |
|----------|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| | | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1 |
| α | 5% | 0 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | 10% | 0 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| | 20% | 0 | 6 | 6 | 7 | 8 | 10 | 11 | 12 | 12 | 13 | 15 |
| | 30% | 0 | 6 | 6 | 12 | 14 | 15 | 16 | 18 | 19 | 20 | 20 |
| | 40% | 0 | 6 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 23 | 24 | 25 | 27 |
| | 50% | 0 | 6 | 12 | 17 | 18 | 23 | 26 | 27 | 29 | 29 | 30 |

Por otra parte, la Tabla 3-2 muestra para cada nivel de variabilidad de la demanda, la cantidad óptima de empleados polifuncionales requerida en cada departamento de la tienda cuando $\Gamma = 1$, es decir, para el escenario más conservador. La tabla incluye las métricas de inversión en polifuncionalidad asociadas a cada nivel de variabilidad de la demanda. A partir de las Tablas 3-1 y 3-2 se puede inferir que en el peor caso y cuando el nivel de variabilidad es el máximo ($\alpha = 50\%$), la cantidad óptima de empleados polifuncionales (λ_l^*) requerida por cada departamento es igual al tamaño de su dotación de empleados. Esta cantidad corresponde al máximo teórico posible, esto es, $\sum_{l \in L} \lambda_l^* = |I|$.

Tabla 3-2: Cantidad óptima de empleados polifuncionales por departamento para cada nivel de variabilidad de la demanda en el peor caso

| | | n_l | | | | | | %EP | %PT |
|----------|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|-----|
| | | 315 | 225 | 135 | 135 | 180 | 360 | | |
| α | 5% | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 20 | 4 |
| | 10% | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 27 | 5 |
| | 20% | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 50 | 10 |
| | 30% | 5 | 3 | 2 | 2 | 3 | 5 | 67 | 13 |
| | 40% | 7 | 4 | 3 | 3 | 3 | 7 | 90 | 18 |
| | 50% | 7 | 5 | 3 | 3 | 4 | 8 | 100 | 20 |
| | | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | Id del departamento | |

3.5.3. ¿Cómo agregar la polifuncionalidad?

Una vez calculada la cantidad óptima de empleados polifuncionales requerida por cada departamento de la tienda para las 66 instancias del problema, se prosigue a aplicar la heurística A-CLC para construir un conjunto de cadenas cerradas que replique el concepto de CLC. El objetivo es determinar en qué departamento adicional va ser entrenado cada empleado polifuncional identificado por la solución del MPLEM, mientras se construye la mínima cantidad de cadenas cerradas. Recordar que nuestro enfoque de solución asume que en cada instancia del problema todos los departamentos de la tienda tienen el mismo nivel de variabilidad en la demanda (α). En consecuencia, en este trabajo la heurística A-CLC se aplica para un caso donde $\%CV_l = \%CV_k, \forall l, k \in L : l \neq k$.

En la Tabla 3-3 se presenta un ejemplo de cómo las cadenas cerradas son obtenidas a través de la implementación de la heurística A-CLC, cuando el nivel de conservatismo es $\Gamma = 1$ y el nivel de variabilidad es $\alpha = 20\%$, tal que $\sum_{l \in L} \lambda_l^* = 15$. A modo de ejemplo, vemos que a partir de la heurística A-CLC se construyeron cuatro cadenas cerradas. La primera cadena corresponde a una CLC, mientras las tres restantes son CCC. Notar que la heurística A-CLC garantiza que se use la totalidad de los empleados polifuncionales disponibles para construir las cadenas cerradas. Finalmente, notar también que la heurística busca en la medida de lo posible maximizar la flexibilidad y por lo tanto evita repetir los mismos arcos de entrenamiento. Es decir, se trata de evitar que empleados polifuncionales pertenecientes a un departamento determinado sean entrenados para trabajar en el mismo departamento adicional.

Tabla 3-3: Ejemplo de cadenas construidas con enfoque heurístico, para $\Gamma = 1$ y $\alpha = 20\%$

| Heurística | λ_l^* | | | | | | Cadenas construidas | %EP | %PT |
|------------|---------------|----|----|----|----|----|----------------------------------|-----|-----|
| | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | | | |
| A-CLC | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | D3 – D1 – D4 – D5 – D6 – D2 – D3 | 50% | 10% |
| | 1 | 1 | 1 | – | 1 | 1 | D1 – D2 – D6 – D3 – D5 – D1 | | |
| | – | – | – | 1 | – | 1 | D4 – D6 – D4 | | |
| | 1 | – | – | – | – | 1 | D1 – D6 – D1 | | |

3.5.4. Análisis de desempeño

La implicancia empresarial de este análisis es que si la variabilidad de la demanda es muy alta y el tomador de decisiones asume una posición demasiado conservadora, esto puede liderar a una solución donde el uso de personal polifuncional sea exhaustivo. Esto podría no ser lo que el tomador de decisiones pretenda. Por lo tanto, nosotros usamos simulación Montecarlo para proveer lineamientos de cómo elegir un apropiado nivel de conservatismo (Γ) y entender mejor cómo las soluciones robustas se desempeñan bajo incertidumbre. Para la simulación, nosotros generamos aleatoriamente 2000 escenarios para los parámetros de demanda r_l , de acuerdo a una distribución normal con un 95% de cobertura, media \bar{r}_l y una desviación estándar $\sigma_l = \alpha \bar{r}_l$, $\forall l \in L$. La estructura de costos en cada departamento de la tienda es la misma, tal que $u = 60$, $s = 15$, y $c = 1$. El objetivo de la simulación es analizar el desempeño promedio de las cadenas cerradas generadas a través de la heurística A-CLC para cada una de las 66 instancias del problema.

La Figura 3-2 muestra los costos totales nominales promedio ($\bar{\varphi}$) obtenidos mediante la evaluación de las soluciones robustas en el MPLEM (1)-(14) para cada instancia del problema. Dado que el costo de capacitación se asumió mínimo, en la función objetivo dominan entonces los costos de sub/sobredotación de personal. Para cada nivel de variabilidad, los gráficos en la Figura 3-2 muestran claramente cómo el costo total promedio (sub/sobredotación + capacitación) disminuye a medida que se incrementa la robustez de la solución, esto es, cuando incrementa Γ . Es decir, los niveles de subdotación y sobredotación de personal (provocados por la variabilidad de la demanda) disminuyen sustancialmente a medida que se incrementa el personal polifuncional de la tienda. Los gráficos también muestran que esta disminución es más grande para problemas con alta variabilidad.

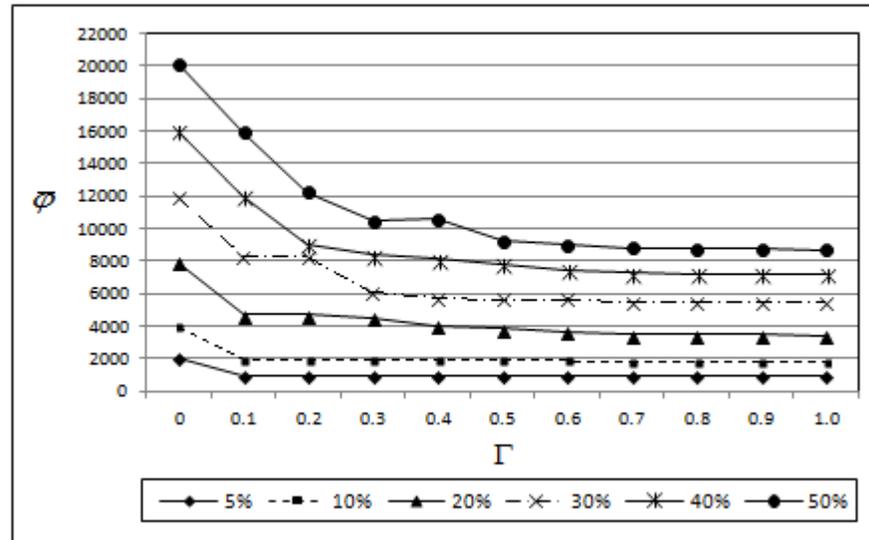


Figura 3-2: Costo total promedio semanal para diferentes niveles de variabilidad y conservatismo

Con el propósito de medir la eficacia de nuestra metodología, nosotros comparamos el desempeño de las cadenas obtenidas a través de la heurística A-CLC contra dos instancias de prueba adicionales. Ambas instancias representan soluciones extremas al problema de polifuncionalidad, éstas son: (a) Polifuncionalidad Total (PT), esto es, cada empleado está capacitado para trabajar en cualquier departamento de la tienda; y (b) Cero Polifuncionalidad (CP), esto es, el personal de la tienda es totalmente especializado. CP es equivalente al caso nominal ($\Gamma = 0$). La Figura 3-3 muestra los ahorros porcentuales en el costo promedio de sub/sobredotación semanal ($\%SSA$) obtenidos mediante la evaluación de las soluciones robustas. Se puede inferir que para altos niveles de variabilidad y bajos valores de Γ , hay un porcentaje importante de la subdotación y la sobredotación que no es posible reducir. Este resultado es esperable, ya que un bajo nivel de conservatismo entrega baja protección para las soluciones. Adicionalmente la Tabla 3-4 presenta, para algunos valores de Γ y para las instancias PT y CP, una gama de métricas ($\%EP$, $\%PT$, $\%SSA$, y $\bar{\varphi}$) para calificar y comparar el desempeño de las soluciones robustas. La Tabla 3-4 recopila los resultados para los 6 niveles de variabilidad.

Tabla 3-4: Métricas de desempeño para diferentes niveles de variabilidad y conservatismo

| Ins | % EP | % PT | % SSA | $\bar{\varphi}$ (US\$) | Ins | % EP | % PT | % SSA | $\bar{\varphi}$ (US\$) |
|-----------------|------|------|-------|------------------------|-----------------|------|------|-------|------------------------|
| $\alpha = 5\%$ | | | | | $\alpha = 10\%$ | | | | |
| $\Gamma = 0$ | 0 | 0 | 0 | 2 033 | $\Gamma = 0$ | 0 | 0 | 0 | 4 026 |
| $\Gamma = 0.1$ | 20 | 4 | 100 | 893 | $\Gamma = 0.1$ | 20 | 4 | 94 | 1 862 |
| $\Gamma = 0.5$ | 20 | 4 | 100 | 893 | $\Gamma = 0.5$ | 23 | 5 | 95 | 1 832 |
| $\Gamma = 0.6$ | 20 | 4 | 100 | 893 | $\Gamma = 0.6$ | 23 | 5 | 95 | 1 832 |
| $\Gamma = 0.7$ | 20 | 4 | 100 | 893 | $\Gamma = 0.7$ | 27 | 5 | 99 | 1 741 |
| $\Gamma = 0.8$ | 20 | 4 | 100 | 893 | $\Gamma = 0.8$ | 27 | 5 | 99 | 1 741 |
| $\Gamma = 0.9$ | 20 | 4 | 100 | 893 | $\Gamma = 0.9$ | 27 | 5 | 99 | 1 741 |
| $\Gamma = 1.0$ | 20 | 4 | 100 | 893 | $\Gamma = 1.0$ | 27 | 5 | 99 | 1 741 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 1 037 | PT | 100 | 100 | 100 | 1 861 |
| $\alpha = 20\%$ | | | | | $\alpha = 30\%$ | | | | |
| $\Gamma = 0$ | 0 | 0 | 0 | 7 956 | $\Gamma = 0$ | 0 | 0 | 0 | 11 919 |
| $\Gamma = 0.1$ | 20 | 4 | 71 | 4 691 | $\Gamma = 0.1$ | 20 | 4 | 56 | 8 239 |
| $\Gamma = 0.5$ | 33 | 7 | 90 | 3 829 | $\Gamma = 0.5$ | 50 | 10 | 96 | 5 621 |
| $\Gamma = 0.6$ | 37 | 7 | 95 | 3 617 | $\Gamma = 0.6$ | 53 | 11 | 96 | 5 606 |
| $\Gamma = 0.7$ | 40 | 8 | 98 | 3 481 | $\Gamma = 0.7$ | 60 | 12 | 99 | 5 454 |
| $\Gamma = 0.8$ | 40 | 8 | 98 | 3 481 | $\Gamma = 0.8$ | 63 | 13 | 99 | 5 417 |
| $\Gamma = 0.9$ | 43 | 9 | 99 | 3 444 | $\Gamma = 0.9$ | 67 | 13 | 99 | 5 406 |
| $\Gamma = 1.0$ | 50 | 10 | 100 | 3 398 | $\Gamma = 1.0$ | 67 | 13 | 99 | 5 406 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 3 515 | PT | 100 | 100 | 100 | 5 492 |
| $\alpha = 40\%$ | | | | | $\alpha = 50\%$ | | | | |
| $\Gamma = 0$ | 0 | 0 | 0 | 15 971 | $\Gamma = 0$ | 0 | 0 | 0 | 20 100 |
| $\Gamma = 0.1$ | 20 | 4 | 45 | 11 966 | $\Gamma = 0.1$ | 20 | 4 | 36 | 15 885 |
| $\Gamma = 0.5$ | 60 | 12 | 92 | 7 782 | $\Gamma = 0.5$ | 77 | 15 | 94 | 9 258 |
| $\Gamma = 0.6$ | 67 | 13 | 96 | 7 420 | $\Gamma = 0.6$ | 87 | 17 | 96 | 8 954 |
| $\Gamma = 0.7$ | 77 | 15 | 98 | 7 247 | $\Gamma = 0.7$ | 90 | 18 | 98 | 8 803 |
| $\Gamma = 0.8$ | 80 | 16 | 98 | 7 221 | $\Gamma = 0.8$ | 97 | 19 | 98 | 8 751 |
| $\Gamma = 0.9$ | 83 | 17 | 99 | 7 170 | $\Gamma = 0.9$ | 97 | 19 | 98 | 8 751 |
| $\Gamma = 1.0$ | 90 | 18 | 99 | 7 148 | $\Gamma = 1.0$ | 100 | 20 | 99 | 8 650 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 7 187 | PT | 100 | 100 | 100 | 8 652 |

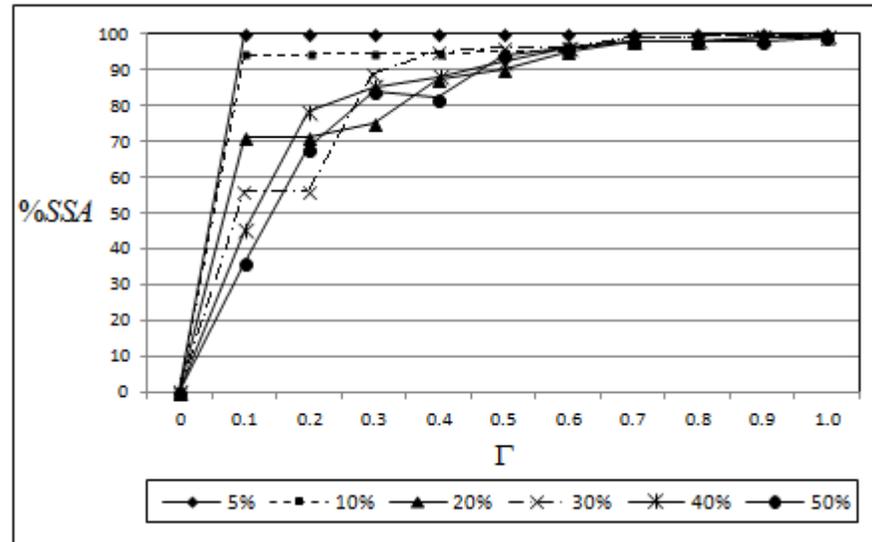


Figura 3-3: Ahorro porcentual en el costo promedio de sub/sobredotación semanal para diferentes niveles de variabilidad y conservatismo

Los gráficos en las Figuras 3-2 y 3-3 son muy útiles cuando los complementamos con la Tabla 3-4. Nosotros podemos usarlos para determinar cuál es un valor aceptable de Γ que permita obtener una solución robusta ante la variabilidad de la demanda y que también sea costo-efectiva. La experiencia del tomador de decisiones y su grado de aversión al riesgo afectará la elección de un valor específico de Γ . De hecho, un tomador de decisiones básicamente se inclinará por soluciones que procuren satisfacer un nivel pre-establecido de servicio al cliente, pero también, evitará soluciones que sean demasiado conservadoras (e.g., $\Gamma=1$ y PT) y que en consecuencia exijan una inversión en polifuncionalidad injustificada y costosa.

La Tabla 3-4 y ambas figuras muestran que independientemente del nivel de variabilidad (α), los valores de $\bar{\varphi}$ y %SSA tienden a estabilizarse a partir de $\Gamma=0.6$. Los resultados, para cada nivel de variabilidad, indican que el conjunto de cadenas cerradas generadas con $\Gamma=0.6$ obtiene al menos un 95% del ahorro en el costo promedio de sub/sobredotación semanal (i.e., $\%SSA \geq 95\%$, $\forall \alpha$). En otras palabras, tales soluciones robustas obtienen al menos el 95% de los beneficios potencialmente alcanzables por el uso de la

polifuncionalidad total, pero haciendo una inversión en polifuncionalidad mucho menor. Este análisis supone que para un tomador de decisiones, un $\%SSA \geq 95\%$ representa una solución de polifuncionalidad razonable que satisface sus intereses.

Finalmente, como parte del análisis del escenario del peor caso ($\Gamma = 1$), la Figura 3-4 muestra cómo aumentan los niveles de polifuncionalidad requeridos (i.e., $\%EP$ y $\%PT$) a medida que también aumenta el nivel de variabilidad de la demanda. Para cada α , la figura también registra cuál fue el $\%SSA$ obtenido por el conjunto de cadenas cerradas generadas mediante el MPLEM y la heurística A-CLC. A partir de las Tabla 3-4 se observa que la estructura PT obtiene la máxima disminución posible en el costo promedio de sub/sobredotación, tal que $\%SSA_{PT} = 100\%$. Sin embargo, también exige la máxima inversión en polifuncionalidad, tal que $\%EP_{PT} = \%PT_{PT} = 100\%$. En contraposición, la estructura CP es el caso opuesto donde no hay inversión en polifuncionalidad y por lo tanto $\%EP_{CP} = \%PT_{CP} = \%SSA_{CP} = 0\%$.

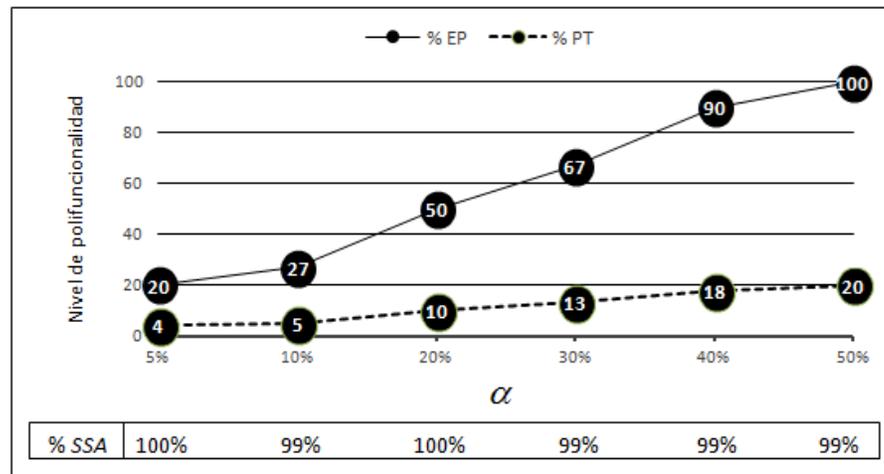


Figura 3-4: Desempeño y niveles de polifuncionalidad alcanzados con la heurística A-CLC para cada nivel de variabilidad, cuando $\Gamma = 1$

Lo más interesante de la Figura 3-4, es que muestra claramente como la solución de polifuncionalidad para el escenario más conservador obtiene casi el 100% de los beneficios

potencialmente alcanzables por el uso de la polifuncionalidad total, pero con una inversión en polifuncionalidad mucho menor. Adicionalmente, los resultados en la Tabla 3-4 confirman que aún en comparación con el escenario del peor caso, la polifuncionalidad total es una solución más costosa (i.e., $\bar{\varphi}_{A-CLC} < \bar{\varphi}_{PT}, \forall \alpha$).

3.6. Conclusiones y futura investigación

En particular, mostramos que el enfoque de Bertsimas y Sim puede ser adaptado a nuestro problema y así obtener soluciones de polifuncionalidad robustas. Esto es, soluciones factibles que provean un buen desempeño para diferentes niveles de variabilidad de la demanda. La principal ventaja del enfoque de optimización robusta seleccionado, es que conserva la estructura lineal del problema de optimización original y también permite elegir al tomador de decisiones un nivel de conservatismo o presupuesto de incertidumbre, el cual es un parámetro crítico para obtener una solución robusta. Hacer esta elección, basado en su experiencia y aversión al riesgo, podría dar al tomador de decisiones más confianza sobre los resultados del modelo.

Sin embargo, permitir al tomador de decisiones elegir el nivel de conservatismo puede ser también un problema, ya que a priori no hay reglas generales para elegir un valor apropiado. Por esta razón, decidimos estudiar mediante simulación Montecarlo el desempeño promedio de las soluciones robustas para distintas combinaciones del nivel de variabilidad de la demanda y el nivel de conservatismo. Esto nos permitió observar, para nuestro caso de estudio, que hay un nivel de conservatismo que alcanza la mayoría de los beneficios potencialmente alcanzables por el uso de la polifuncionalidad, pero haciendo una inversión en polifuncionalidad que es mucho menor a la exigida por la solución robusta con el nivel de conservatismo máximo (i.e., escenario del peor caso). Un análisis de este tipo puede ser muy útil para los tomadores de decisiones, pues les permite conocer cómo los distintos niveles de conservatismo afectan las decisiones de inversión en polifuncionalidad y las métricas de desempeño asociadas a la operación efectiva del sistema. Sin este conocimiento, la aplicabilidad del enfoque de optimización robusta se ve enormemente disminuida.

Nuestros resultados brindan una base para el diseño de políticas de polifuncionalidad que sean atractivas y viables para industrias del sector servicios. Dichas políticas van dirigidas a responder dos preguntas fundamentales: cuánta polifuncionalidad agregar y cómo agregarla. Respecto a la primera pregunta – cuánta polifuncionalidad aplicar – los resultados mostraron que aun cuando el costo de capacitación se asuma a un nivel mínimo, no es necesario tener una configuración con polifuncionalidad total para alcanzar el máximo beneficio posible. La cantidad de empleados polifuncionales por actividad aumenta gradualmente a medida que aumenta el nivel de variabilidad de la demanda. De hecho, estos aumentos son mayores para aquellas actividades con una demanda media mayor. Bajo esta misma línea, otros resultados muestran que aquellas actividades sin incertidumbre en la demanda no requerirán personal polifuncional y por lo tanto no deberían ser incluidas en una posible cadena de actividades. Sin embargo, a medida que la media y la variabilidad de la demanda de una actividad son mayores, más altos también serán los beneficios por incrementar la dotación polifuncional de esa actividad e incluirla en estructuras de polifuncionalidad que repliquen el concepto de cadena larga cerrada. Nosotros modelamos estructuras de polifuncionalidad donde los empleados polifuncionales están capacitados para trabajar en sólo dos actividades.

Respecto a la segunda pregunta – cómo aplicar la polifuncionalidad – los resultados mostraron que la mejor forma de agregar polifuncionalidad es generando estructuras de dotación de personal que combinen personal polifuncional con personal especializado. Adicionalmente, al igual que en sistemas balanceados, los resultados indican que las estructuras de polifuncionalidad que replican el concepto de cadena larga cerrada se presentan como el mejor diseño de polifuncionalidad entre todas las configuraciones con 2-flexibilidad. Sin embargo, para sistemas desbalanceados, en lugar de usar una sola CLC, varias cadenas cerradas de diferentes largos forman parte de la solución. Los resultados también mostraron que los mejores rendimientos del encadenamiento se obtienen cuando se maximiza la flexibilidad, esto es, cuando se evita repetir en la medida de lo posible los mismos arcos de entrenamiento.

Trabajos futuros en esta área podrían buscar levantar supuestos realizados en la modelación e incorporar los siguientes elementos: (1) Considerar costos de subdotación, sobredotación, y capacitación diferentes por departamento. (2) Incorporar en el modelo de optimización decisiones de contratación de personal. Podría ser interesante evaluar una política de flexibilidad híbrida que considere decisiones de polifuncionalidad y dotación de personal. (3) De acuerdo a la distribución de probabilidades de las demandas por actividades y a la estructura de costos del sistema modelado, desarrollar una ecuación cerrada que permita estimar de manera aproximada la dotación de empleados polifuncionales y especializados para cada actividad del sistema. Esto sería equivalente a la política óptima de polifuncionalidad en el caso estocástico, la cual minimiza el costo total esperado. Los resultados de esta política estocástica podrían ser comparados con las soluciones de polifuncionalidad entregadas a partir del enfoque de optimización robusta, la cual no requiere conocimiento de las probabilidades asociadas a la realización de la demanda.

4. MODELACIÓN DE LOS BENEFICIOS DE LA POLIFUNCIONALIDAD CON CADENAS CERRADAS EN SISTEMAS DESBALANCEADOS

César A. Henao¹, Juan Carlos Muñoz¹ y Juan Carlos Ferrer²

¹Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile; y ²Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Resumen. La polifuncionalidad es una herramienta atractiva para reducir los costos laborales y mejorar los niveles de servicio en las empresas de servicios que enfrentan una demanda variable y una fuerte estacionalidad. Este trabajo presenta una nueva metodología para estructurar las habilidades polifuncionales de un conjunto de empleados que inicialmente sólo cuentan con una función especialista. Asumiendo demanda estocástica y una modelación continua de la fuerza laboral, la metodología descompone el problema de polifuncionalidad en tres etapas y lo resuelve de forma secuencial. La primera etapa entrega a los tomadores de decisiones una expresión analítica simple para estimar la dotación de empleados polifuncionales requerida en cada actividad del sistema. La segunda etapa aplica heurísticas constructivas a estas estimaciones para generar un conjunto factible de cadenas cerradas para el sistema. La tercera etapa usa simulación Montecarlo y un modelo de programación lineal para evaluar el desempeño de las estructuras tipo cerradas cadenas construidas en la etapa dos. Como resultado se obtienen estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas cerradas que son robustas ante la variabilidad de la demanda, minimizan el costo total esperado de subdotación, y exhiben el mejor desempeño a nivel costo-efectivo. Este trabajo también se focaliza en entregar a los tomadores de decisiones políticas de polifuncionalidad que respondan a tres preguntas fundamentales sobre la polifuncionalidad en sistemas desbalanceados: dónde, cuánta, y cómo agregarla.

4.1. Introducción

El sector servicios es reconocido por su rápido crecimiento, ser una industria altamente competitiva, y el uso intensivo de personal. El sector incluye industrias tales como el retail, salud, transporte, y centros de llamadas. En un contexto dinámico, el sector servicios, y en particular la industria de retail, enfrentan fenómenos predecibles como la estacionalidad de la demanda, y fenómenos no predecibles como la incertidumbre de la demanda y el ausentismo no programado de personal. Estos fenómenos complican la gestión eficiente de los recursos humanos (RRHH), pues dificultan el calce entre la oferta y la demanda al planificar los turnos de trabajo. Se busca minimizar los costos laborales, manteniendo el mejor nivel de servicio posible ofrecido al cliente, un elemento central en la oferta del sector servicios. Sin embargo, incluso retailers con un buen sistema de programación de personal pueden enfrentar problemas de sobredotación y subdotación de personal en varios momentos durante el curso de una semana, y en el último caso el desbalance generado puede propagarse a periodos sucesivos (Henaó et al., 2015a). Una inadecuada gestión de estos dos problemas resulta en la pérdida de ingresos, deterioro en el nivel de servicio ofrecido al cliente, incrementos en los costos laborales, y un impacto negativo en la reputación del negocio (Kabak et al., 2008; Simchi-Levi y Wei, 2012).

En tal contexto, dinámico e incierto, la flexibilidad laboral puede ser vital para minimizar el descalce entre la oferta laboral y la demanda. Muchos autores en diferentes sectores han encontrado que el personal polifuncional tiende a mejorar la flexibilidad, ya que brinda la capacidad de minimizar tal descalce (e.g., Felan et al., 1993, Molleman y Slomp, 1999; Hopp et al., 2004; Simchi-Levi, 2010). Estos empleados polifuncionales no sólo pueden ser usados para proveer gran flexibilidad que satisfaga la estacionalidad de la demanda, sino también, como una medida de contingencia para mitigar los efectos negativos de fenómenos no predecibles (Easton, 2011 y MacVicar et al., 2015). Sin embargo, la polifuncionalidad viene con un costo, pues contratar y entrenar empleados en múltiples actividades puede ser muy costoso. Por lo tanto, llega a ser importante establecer políticas claras que permitan identificar diseños eficientes de polifuncionalidad a un costo reducido.

Tales políticas, para ser efectivas, deben definir un conjunto de reglas simples de decisión que establezcan los patrones de habilidades que adoptarán los empleados. En lo posible, deben responder tres preguntas fundamentales: dónde agregar polifuncionalidad, cuánta agregar, y cómo debería ser agregada. Muchos autores en diferentes sectores han coincidido en concluir que los empleados con dos habilidades aparecen como la fuerza laboral más costo-efectiva (e.g., Felan et al., 1993; Brusco y Johns, 1998; Campbell, 1999; Yang, 2007; Kim y Nembhard, 2010; Simchi-Levi, 2010; Henao et al., 2015a). Este tipo de política de flexibilidad parcial es conocida como flexibilidad grado 2. Apoyados en esta política, varios investigadores han estudiado una estrategia de polifuncionalidad conocida como encadenamiento (e.g., Jordan y Graves, 1995; Hopp et al., 2004; Simchi-Levi y Wei, 2012; Henao et al., 2015b). El encadenamiento, concepto introducido por Jordan y Graves (1995) en un contexto de manufactura, propone que algunos empleados sean entrenados para trabajar en una segunda actividad, tal que el conjunto de entrenamientos adicionales requeridos por estos empleados polifuncionales formarán cadenas en un grafo bipartito.

En un contexto de manufactura, Simchi-Levi y Wei (2012) muestran analíticamente para un sistema balanceado (i.e., donde el número de nodos de oferta (plantas) es igual al número de nodos de demanda (productos)) y con demandas estocásticas e independientes, que una Cadena Larga Cerrada (CLC) que conecte todos los nodos de oferta y demanda del sistema, son el diseño de polifuncionalidad óptimo entre todas las configuraciones con flexibilidad grado 2. También muestran que varias Cadenas Cortas Cerradas (CCC), donde cada CCC conecta un número sustancial de nodos de oferta y demanda, se desempeñan tan bien como la CLC. Sin pérdida de generalidad, la Figura 4-1(a-b) muestra un ejemplo de las estructuras de encadenamiento CLC y CCC en sistemas balanceados. En cada estructura los nodos de oferta están ubicados a la izquierda y los nodos de demanda están ubicados a la derecha. En la Figura 4-1 y a través de este trabajo, una línea sólida representa un recurso especializado y una línea punteada un recurso polifuncional. Por otra parte, el problema de asignación de empleados en el sector servicios es inherentemente desbalanceado. Haciendo una analogía con sistemas de manufactura, empleados corresponden a plantas, y actividades a productos. Ya que el número de empleados excede

significativamente el número de actividades, el desbalance surge. Finalmente, aunque Simchi-Levi y Wei (2012) focalizan su estudio en sistemas balanceados, también agregan que sus resultados deberían ser extensibles a sistemas desbalanceados.

Este trabajo propone una simple y novedosa metodología para modelar los beneficios del encadenamiento en sistemas desbalanceados y definir políticas que respondan a las tres preguntas fundamentales sobre polifuncionalidad. La metodología propuesta descompone el problema de polifuncionalidad en tres etapas y lo resuelve de forma secuencial. Las etapas de solución propuestas son las siguientes: (1) Desarrollar una expresión analítica que permita obtener una aproximación para la cantidad óptima de empleados polifuncionales por actividad procurando minimizar el costo total esperado. (2) Mediante heurísticas constructivas generar un conjunto factible de cadenas cerradas, a partir de la dotación de empleados polifuncionales por actividad entregada en la etapa uno. (3) Mediante simulación Montecarlo y un Modelo de Programación Lineal (MPL), evaluar el desempeño de las estructuras tipo cadenas cerradas construidas en la etapa dos. Nosotros asumimos en la metodología que las demandas por actividad son estocásticas e independientes. Finalmente, este trabajo aplica esta metodología a un caso de prueba hipotético pero realista basado en una firma de retail chilena. Se analiza el desempeño de la metodología propuesta probando distintos escenarios de las demandas por actividades (en este caso, departamentos), mientras se aumenta gradualmente el costo de capacitación. El propósito es validar la metodología propuesta e identificar aquellas estructuras tipo cadenas cerradas que sean robustas ante la variabilidad de la demanda y también obtengan el mejor desempeño a nivel costo-efectivo.

El resto del capítulo está dividido en cinco secciones. La sección 4.2 resume la revisión de literatura sobre enfoques y procedimientos que han sido usados para estudiar los beneficios de la polifuncionalidad a través del uso de cadenas. La sección 4.3 define el problema estudiado y establece los supuestos y fundamentos teóricos considerados. La sección 4.4 presenta la metodología de solución propuesta. La sección 4.5 muestra los experimentos realizados y los resultados obtenidos. Finalmente, la sección 4.6 presenta las conclusiones de este trabajo y sugerencias para futura investigación.

4.2. Revisión de literatura

Trabajos previos han abordado estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas para minimizar el descalce entre la oferta y la demanda. Las columnas dispuestas en la Tabla 4-1 representan un resumen de las principales características de estudios previos reportados en la literatura.

Tabla 4-1: Características de estudios previos sobre polifuncionalidad con uso de cadenas

| Referencia | ND-RRHH | MF | E | B/D | FS | TS | ID | IC | IO | Método | Aplicación |
|--------------------------|---------|-----|----------------------------|------|------|---------|----|----|----|-------------|---------------------|
| Jordan y Graves (1995) | A | Par | CLC, CCC, CA | B, D | P | Hom/Het | Sí | - | - | S + A | Manufactura |
| Brusco y Johns (1998) | D+AT | Par | CLC, CR | D | P | Het | No | Sí | No | MPE | Servicios |
| Hopp et al. (2004) | A | Var | TxU, CLC, CA | B, D | S | Het | Sí | Sí | No | PM + S | Manufactura |
| Inman et al. (2004) | D+A | Par | UxT, TxU, CR, CLC, CCC, CA | D | S | Hom | No | No | Sí | S | Manufactura |
| Jordan et al. (2004) | A | Par | CLC, FB, R | D | P | Hom/Het | Sí | Sí | No | TC + S | Manufactura |
| Iravani et al. (2005) | A | Par | CLC, CA, CR, R | D | S, P | Het | Sí | Sí | No | S | Centros de llamadas |
| Simchi-Levi y Wei (2012) | A | Par | CLC, CCC, CA | B | P | Hom | Sí | No | - | A | Manufactura |
| Paul y MacDonald (2014) | D+A | Var | CLC, CR | D | P | Het | Sí | Sí | No | MPE + H + A | Salud |
| Henao et al. (2015b) | A | Var | CLC, CCC, CR | D | P | Het | Sí | No | No | MPE + OR | Retail |

1. *Nivel de Decisión de los RRHH (ND-RRHH) estudiado*: La gestión de los recursos humanos puede ser analizada como un proceso jerárquico de tres niveles involucrando un conjunto de decisiones interrelacionadas sobre diferentes horizontes de planificación. Las decisiones tomadas en un nivel inferior son restringidas por las decisiones tomadas en niveles superiores. Los tres niveles jerárquicos son planificación, programación, y asignación. Esta caracterización fue presentada en

Abernathy et al. (1973), y ha sido frecuentemente citada por otros trabajos en la literatura (e.g., Campbell, 1999; Easton, 2011; Henao et al., 2015a). ND-RRHH indica qué problema de decisión fue incluido en cada estudio. La única decisión considerada a nivel de planificación es determinar los niveles de dotación de personal por actividad (D). Las decisiones a nivel de programación son (a) Asignación de turnos (AT), es decir, asignar a empleados turnos de trabajo diarios; (b) Asignación de días de descanso (ADD), es decir, asignar días de descanso entre días de trabajo a empleados sobre un horizonte de planificación dado (típicamente una semana); y (c) Programación del semanal de turnos (PST), es decir, cuando los días de descanso y turnos de trabajo son asignados simultáneamente. Finalmente, el nivel de asignación (A) considera la asignación simple de empleados a actividades particulares sin tener en cuenta la asignación de turnos.

2. *Multifuncionalidad* (MF): Indica si el modelo usa un parámetro para representar todas las habilidades fijas de un empleado (Par) o una variable representando la decisión de que un empleado sea entrenado o no en una particular habilidad adicional (Var).
3. *Encadenamiento* (E): Indica el tipo de estructura de polifuncionalidad que fue modelada, evaluada, o inducida en el estudio, estas son: (a) Cadena Larga Cerrada (CLC), es un grafo bipartito con igual cantidad de nodos de oferta y demanda, tal que sus arcos forman exactamente un ciclo no dirigido conteniendo todos los nodos del grafo (Simchi-Levi y Wei, 2012); (b) Cadena Corta Cerrada (CCC), es un sub-grafo bipartito inducido que forma un ciclo no dirigido; (c) Cadena Abierta (CA), es un sub-grafo bipartito inducido que forma un camino no dirigido, es decir, un ciclo no dirigido sin uno de sus arcos; (d) Cadena Reciproca (CR), es una CCC formada sólo por un par de nodos de oferta y un par de nodos de demanda; (e) Todos para Uno (TxU), todos los recursos polifuncionales (e.g., empleados) del sistema están capacitados para ser asignados a una sola actividad. Estructura útil para sistemas en serie con presencia de un cuello de botella; (f) Uno para Todos (UxT), sólo hay un recurso polifuncional en el sistema y está capacitado para ser asignado en cualquier actividad; (g) *Full Backup* (FB), cada actividad del sistema dispone de un recurso

polifuncional perteneciente a otra actividad, sin embargo, pueden existir una o más actividades con una oferta totalmente especializada; y (h) Random (R), estructuras de polifuncionalidad donde los recursos son capacitados al azar y que no exigen formación de cadenas. La Figura 4-1(a-h) presenta esquemas de las estructuras de polifuncionalidad citadas previamente en sistemas balanceados. En cada estructura los nodos de oferta están ubicados a la izquierda y los nodos de demanda están ubicados a la derecha.

4. *Sistema Balanceado o Desbalanceado (B/D) en la modelación:* (a) Balanceado (B), considera que el sistema tiene igual cantidad de nodos de oferta (i.e., recursos) y nodos de demanda (i.e., actividades). (b) Desbalanceado (D), considera que el sistema no tiene paridad entre la cantidad de nodos de oferta y demanda.

5. *Flujo del Sistema (FS):* De acuerdo al tipo de proceso de producción de bienes y servicios modelado, los requerimientos de demanda pueden ser procesados bajo dos tipos de flujo, estos son: (a) Serie (S), la satisfacción de los requerimientos de demanda obedece a una serie de etapas secuenciales. Se emplea típicamente en la industria manufacturera para la producción en masa de un producto uniforme; y (b) Paralelo (P), sistema en el que los requerimientos de demanda para cada actividad se satisfacen independientemente unos de otros.

6. *Tipo de Sistema (TS) en la modelación:* (a) Homogéneo (Hom), considera que para efectos del estudio todas las actividades, departamentos o fábricas (i.e., recursos) que componen el sistema son idénticas, es decir, que tengan la misma oferta y capacidad instalada (e.g., empleados, máquinas, horas-hombre), demandas idénticas (i.e., media y varianza), igual productividad, igual polifuncionalidad, igual probabilidad de ausentismo no programado. (b) Heterogéneo (Het), considera que no todas las actividades, departamentos o fábricas que componen el sistema son idénticas.

7. *Incertidumbre en la Demanda (ID):* Indica si el problema considera variabilidad en la demanda.

8. *Incertidumbre en la Capacidad (IC)*: Indica si el problema considera variabilidad en la capacidad. Es decir, que los recursos del sistema tengan velocidades o niveles de productividad con algún nivel de incertidumbre.
9. *Incertidumbre en la Oferta (IO)*: Indica si el problema considera variabilidad en la oferta o ausentismo no programado de personal.
10. *Método*: El método de solución usado. Puede ser: (a) Heurísticas (H); (b) Modelos de Programación Entera (MPE); (c) Simulación (S); (d) Optimización Robusta (OR); (e) Teoría de Colas (TC); (f) Procesos de Markov (PM); y (g) Analítico (A).
11. *Aplicación*: La industria o sector donde el modelo fue aplicado.

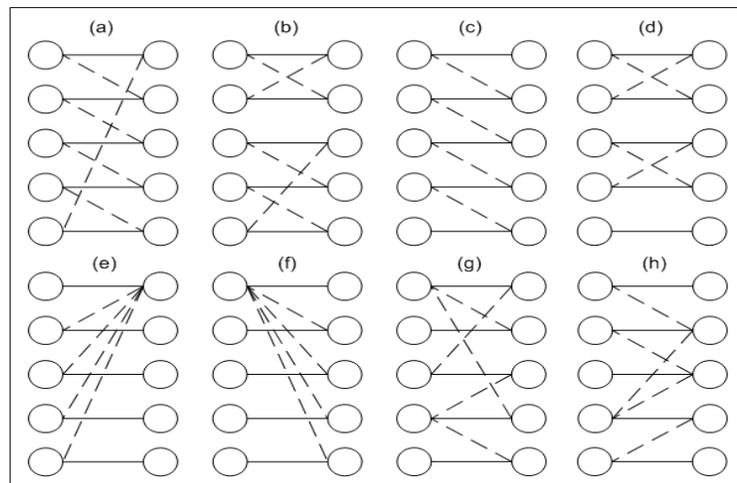


Figura 4-1: Comparación de estructuras de polifuncionalidad: (a) CLC; (b) CCC; (c) CA; (d) CR; (e) TxU; (f) UxT; (g) FB; y (h) R

La literatura sobre las estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas demuestra el considerable esfuerzo que se ha hecho para mejorar el entendimiento sobre este tema, tanto para la industria de manufactura como para el sector servicios. La Tabla 4-1 muestra que la gran mayoría de los estudios incorporan la polifuncionalidad como un parámetro y que las estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas son pre-seleccionadas a priori y

posteriormente son evaluadas para medir y comparar sus desempeños. Esto tiene el efecto negativo de restringir las consideraciones de diseño y limitar las posibilidades de encontrar mejores soluciones de polifuncionalidad.

En contraposición, existen pocos estudios en el sector servicios que incorporan la polifuncionalidad como una variable de decisión en la modelación, y que también procuran que esta polifuncionalidad sea replicada a través del uso de cadenas (Paul y MacDonald, 2014 y Henao et al., 2015b). Paul y MacDonald (2014) desarrollan modelos de optimización enteros no lineales para evaluar los beneficios de la polifuncionalidad, a través del encadenamiento, sobre un problema de asignación de enfermeras a departamentos bajo demanda estocástica e independiente. Su modelación decide cuál es la cantidad de enfermeras polifuncionales que minimiza el costo total esperado por subdotación, mientras simultáneamente satisfacen requerimientos pre-establecidos de nivel de servicio y calidad en la atención. Dada la dificultad que tienen para obtener soluciones exactas de los modelos de optimización propuestos (incluso para problemas pequeños), ellos desarrollan algoritmos evolutivos para producir soluciones eficientes y de buena calidad. Por otra parte, Henao et al. (2015b) proponen un modelo de programación lineal entera mixta para el problema de asignación de empleados a departamentos de una tienda de retail bajo demanda incierta. Su modelación decide de manera simultánea cuáles empleados deben ser entrenados, en qué habilidades, y cómo será su asignación de trabajo en un horizonte de planificación de una semana. Su modelación se diferencia del resto de los trabajos en la literatura, porque las restricciones del modelo de optimización garantizan un plan de capacitación que exige la formación de cadenas cerradas (i.e., CLC, CCC, CR). Adicionalmente, los autores incorporan en la formulación matemática el enfoque de optimización robusta, con el propósito de generar soluciones de polifuncionalidad robustas ante la variabilidad de la demanda. La metodología de solución, de ambos trabajos, busca resolver de forma simultánea las preguntas sobre la polifuncionalidad. Finalmente, ambos trabajos coinciden en desarrollar modelos de optimización sofisticados para estudiar los beneficios del encadenamiento en sistemas desbalanceados.

A diferencia de investigaciones previas, el presente trabajo propone desarrollar una metodología de solución secuencial, que de manera simple y eficiente permita modelar los beneficios del encadenamiento en sistemas desbalanceados y definir políticas que respondan a las tres preguntas fundamentales sobre polifuncionalidad. Adicionalmente, este trabajo entrega de manera novedosa una expresión analítica para calcular en forma aproximada la cantidad óptima de empleados polifuncionales por actividad que minimice el costo total esperado. De acuerdo a la distribución de probabilidades de las demandas por actividades y a la estructura de costos del sistema modelado, los tomadores de decisiones tendrán en esta metodología una herramienta simple y útil para generar diseños de polifuncionalidad costo-efectivos. Finalmente, la metodología de solución propuesta puede ser usada en distintas industrias del sector servicios.

4.3. El problema

El problema que nosotros proponemos estudiar consiste en desarrollar una solución secuencial, rápida, y eficiente para un problema ampliamente estudiado en la literatura: Capacitación y asignación de personal polifuncional. Para un horizonte de planificación semanal, el problema consiste en asignar horas de trabajo a cada empleado y diseñar un plan de capacitación asociado a una fuerza laboral conocida y que inicialmente está capacitada para trabajar en una sola actividad. Particularmente, en este trabajo estamos interesados en comprender mejor como el uso de estructuras tipo cadenas (e.g., CLC y/o CCC) pueden ser poderosamente útiles para enfrentar una demanda variable y minimizar la subdotación de personal. Sin pérdida de generalidad, la modelación asumirá el contexto de una tienda de retail en el cual los empleados pueden ser entrenados para trabajar en un segundo departamento (actividad) convirtiéndose en polifuncionales.

Nuestra formulación del problema refleja los siguientes supuestos: (1) La demanda semanal por horas para cada departamento tiene una distribución de probabilidad conocida y se asume correlación cero entre las demandas por departamento. Asumir independencia entre las demandas por departamento puede ser poco realista, pero es un supuesto comúnmente usado en la literatura sobre polifuncionalidad. (2) La demanda para cada

departamento puede ser satisfecha parcialmente. Costos de subdotación son por lo tanto incluidos en la función de costo total. Nosotros asumimos que estos costos son iguales por departamento e independientes del nivel de subdotación (i.e., costos de subdotación lineales). (3) Se asume que el problema de asignación de personal es totalmente equilibrado, es decir, las horas disponibles para ser asignadas en cada departamento son exactamente igual al valor en horas de la demanda media de cada departamento. En consecuencia, la suma de todas las horas disponibles para ser asignadas a través de todos los empleados en la tienda es igual a la suma de las medias del número de horas requeridas en cada departamento. Henao et al. (2015a) encontraron que las configuraciones de polifuncionalidad de mínimo costo se obtienen cuando la relación entre la oferta y la demanda total está en equilibrio. (4) No se considera incertidumbre en la oferta, es decir, no hay ausentismo no programado de personal. (5) Todos los empleados tienen igual tipo de contrato, por lo que deben trabajar semanalmente la misma cantidad de horas. (6) Al inicio del horizonte de planificación todos los empleados son especialistas, es decir, entrenados para trabajar en un sólo departamento. (7) La mano de obra es homogénea, es decir, la productividad individual de los empleados es la misma independiente del número departamentos en la que ellos estén entrenados, y del número de ellos que se desempeñen simultáneamente. Para la industria del retail no es muy importante considerar mano de obra heterogénea porque el nivel de complejidad de las tareas no es tan alto y variado como puede ocurrir en la industria de manufactura, para la cual la heterogeneidad de los empleados es usualmente asumida (Henao et al. 2015a). (8) El costo de capacitación es incluido en la función de costo total. Nosotros asumimos que estos costos son iguales por departamento. Finalmente, (9) Empleados polifuncionales sólo pueden trabajar en un total de dos departamentos.

4.4. Metodología

El objetivo de la metodología propuesta es definir políticas de polifuncionalidad que respondan a tres preguntas fundamentales: dónde agregar la polifuncionalidad, cuánta agregar, y cómo debería ser agregada. La metodología de solución descompone el problema polifuncionalidad en tres etapas y lo resuelve de forma secuencial. La

descripción de cada etapa de la metodología es presentada bajo las siguientes subsecciones: (4.1) Etapa 1: Expresión analítica para el uso de la polifuncionalidad; (4.2) Etapa 2: Generación del conjunto atractivo de cadenas cerradas; y (4.3) Etapa 3: Evaluación del desempeño y selección de las mejores estructuras de polifuncionalidad.

4.4.1. Etapa 1: Expresión analítica para el uso de la polifuncionalidad

Esta primera etapa de la metodología responde a dos de las tres preguntas fundamentales sobre la polifuncionalidad: ¿Dónde agregarla? y ¿Cuánta agregar? El objetivo es determinar la dotación óptima de empleados polifuncionales y especialistas para cada departamento de la tienda que minimiza el costo total esperado. La dotación óptima de polifuncionalidad en cada departamento dependerá fuertemente del valor de los parámetros que rijan la función de densidad de probabilidad (f.d.p) de la demanda en cada uno de ellos (e.g., media y varianza). Esto supone entonces, en ausencia de estacionalidad, que departamentos cuyas demandas tengan una varianza igual a cero no requerirán personal polifuncional y por lo tanto no deberían ser incluidos en una posible cadena de departamentos. Sin embargo, a medida que la media y el coeficiente de variación de la demanda de un departamento sean mayores, más altos deberían ser los beneficios por incrementar la dotación polifuncional de ese departamento e incluirlo en una cadena.

El enfoque de solución está tomado de soluciones aproximadas a problemas logísticos complejos tales como el ruteo de vehículos o la localización óptima de centros de distribución (Daganzo, 2005). En estos modelos se busca determinar una aproximación a la solución buscada usando criterios de optimalidad local y asumiendo que las condiciones locales son explicables en toda la región a analizar. Análogamente, aquí se propone realizar un análisis aislado por departamento para determinar en forma aproximada la dotación óptima de empleados polifuncionales. En este análisis se asume que todos los departamentos de la tienda son exactamente iguales al departamento bajo análisis. Es decir, todos los departamentos tienen la misma dotación, idéntica f.d.p de la demanda, e iguales costos de capacitación y subdotación. Aún más, asumiremos que la tienda cuenta con sólo dos departamentos idénticos. De esta forma, la modelación considera una estructura de

polifuncionalidad simple tipo cadena recíproca. Es decir, en una cadena conformada por sólo dos departamentos, el departamento bajo análisis tiene asociado un departamento espejo idéntico. El departamento espejo es el único que puede transferirle empleados polifuncionales en escenarios de subdotación al departamento analizado, y viceversa. El enfoque de solución para determinar la dotación óptima de empleados polifuncionales es dividido en dos subsecciones establecidas bajo los siguientes encabezados: (a) Valor óptimo continuo de la polifuncionalidad y (b) Valor óptimo discreto de la polifuncionalidad.

a) Valor óptimo continuo de la polifuncionalidad

A través de un análisis continuo, el objetivo de esta primera subsección es desarrollar una expresión analítica para encontrar el valor óptimo en horas hombre polifuncionales que minimice una función de costo total esperado. A continuación presentamos la notación matemática para calcular el costo total esperado cuando asumimos una estructura de polifuncionalidad tipo cadena recíproca.

VARIABLES ALEATORIAS:

D_l, D_e Demanda semanal en el departamento l y en el departamento espejo e ; [Horas-sem]

s_l Subdotación semanal en el departamento l ; [Horas-sem]

PARÁMETROS:

n_l, n_e Dotación total semanal en el departamento l y en el departamento espejo e ; [Horas-sem]

c^d Costo de subdotación por hora. Equivalente al costo esperado por ventas perdidas, [\$/Hora]

- c^c Costo de entrenamiento por hora. Se calcula como el costo total de capacitación de un empleado, dividido por el tiempo promedio de vinculación de un empleado en la empresa; [\$/Hora]
- h Cantidad de horas semanales que debe trabajar un empleado de acuerdo a su contrato. Es igual para todos los empleados, dado que todos los empleados tienen el mismo contrato; [Horas-sem / Empleado]

VARIABLES:

- \bar{n} : Horas polifuncionales del departamento espejo capacitadas para trabajar en el departamento bajo análisis; [Horas-sem]
- $f_{D_l}(d)$ Función de densidad de la demanda del departamento l
- $F_{D_l}(d)$ Función acumulada de la demanda del departamento l
- $f_{s_l(\bar{n})}(x)$ Función de densidad de la subdotación del departamento l , dado que el departamento espejo tiene \bar{n} horas-sem polifuncionales, $\forall \bar{n} \geq 0, x \geq 0$
- $E(s_l(\bar{n}))$ Subdotación esperada en el departamento l , dado que el departamento espejo tiene \bar{n} horas-sem polifuncionales, $\forall \bar{n} \geq 0$; [Horas-sem]

Dado $\bar{n} > 0$, el costo total esperado semanal del departamento l , que representa la suma del costo de subdotación esperado y el costo de capacitación incurrido, se expresa de la siguiente forma:

$$CTP_l(\bar{n}) = c^d E(s_l(\bar{n})) + c^c \bar{n} \quad (4.1)$$

La expresión (4.1) puede ser expandida de la siguiente forma:

$$CTP_l(\bar{n}) = c^d \left[\int_{x=0}^{\infty} f_{s_l(\bar{n})}(x) x dx \right] + c^c \bar{n} \quad (4.2)$$

De igual manera podemos hallar una expresión para el costo total esperado del departamento l cuando estamos en un escenario donde no invertimos en polifuncionalidad (i.e., cuando todos los empleados se mantienen especialistas, $\bar{n} = 0$), veamos:

$$CTW_l(\bar{n}) = c^d E(s_l(\bar{n})) \quad (4.3)$$

$$CTW_l(\bar{n}) = c^d \int_{x=0}^{\infty} f_{s_l(\bar{n})}(x) x dx = c^d \int_{x=0}^{\infty} f_{D_l}(n_l + x) x dx \quad (4.4)$$

De la ecuación (4.2) podemos ver que para calcular el valor óptimo de \bar{n} , necesitamos estimar primero $f_{s_l(\bar{n})}(x)$. Paul y MacDonald (2014) explican que para una estructura de polifuncionalidad tipo cadena recíproca, denotando dos departamentos como l y e , la probabilidad de que ocurra una subdotación alrededor de x en el departamento l puede ser calculada como la suma de dos efectos: un efecto base (i.e., cuando el departamento espejo no puede prestar empleados polifuncionales) y un efecto directo (i.e., cuando el departamento espejo puede prestar empleados polifuncionales). Bajo esta premisa y dado que ambos departamentos son idénticos (i.e., $n_l = n_e = n$ y $D_l = D_e = D$) se puede calcular la probabilidad de que ocurra una subdotación alrededor de x en el departamento l como (ver apéndice A):

$$\begin{aligned} f_{s(\bar{n})}(x) = & f_D(n+x)[1-F_D(n)] \\ & + \int_{y=0}^{\bar{n}} f_D(n+y+x)f_D(n-y)dy \\ & + f_D(n+\bar{n}+x)F_D(n-\bar{n}) \end{aligned} \quad (4.5)$$

La expresión (4.5) es válida independiente de la f.d.p que se asuma para las demandas. El primer término en la ecuación representa el efecto base y calcula la subdotación esperada en el departamento l cuando no hay horas polifuncionales disponibles en el departamento espejo para ser prestadas (i.e., la demanda supera la dotación disponible). Los dos últimos términos representan el efecto directo de la polifuncionalidad. El segundo término calcula la subdotación esperada en el departamento l cuando sólo una parte de las

horas polifuncionales (y) del departamento espejo están disponibles para ser usadas por el departamento l . El tercer término calcula la subdotación esperada en el departamento l cuando todas las horas polifuncionales (\bar{n}) del departamento espejo están disponibles para ser usadas. Reemplazando (4.5) en (4.2) obtenemos la expresión del costo total esperado semanal:

$$\begin{aligned}
 CTP(\bar{n}) = & c^d \left[\int_{x=0}^{\infty} f_D(n+x)[1-F_D(n)]xdx \right. \\
 & + \int_{x=0}^{\infty} \int_{y=0}^{\bar{n}} f_D(n+y+x)f_D(n-y)xdydx \\
 & \left. + \int_{x=0}^{\infty} f_D(n+\bar{n}+x)F_D(n-\bar{n})xdx \right] + c^c \bar{n}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Para encontrar el valor óptimo de \bar{n} que minimiza la función de costo total esperado (4.6), se requiere resolver $\frac{\partial CTP(\bar{n})}{\partial \bar{n}} = 0$. Resolviendo esta ecuación, el modelo se resume en hallar una cantidad \bar{n}^* que satisfaga (ver Apéndice B):

$$F_D(n - \bar{n}^*) = \sqrt{\frac{c^c}{c^d}} \quad \therefore \quad \bar{n}^* = n - \Phi^{-1}\left(\sqrt{\frac{c^c}{c^d}}\right); \quad t.q \quad c^c \leq c^d; c^d > 0 \tag{4.7}$$

La ecuación (4.7) se obtiene al suponer que las f.d.p de las demandas por departamento distribuyen $N(\mu, \sigma^2)$ y que la media de la demanda es exactamente igual a la dotación del departamento (i.e., $\mu = n$). Donde $\Phi^{-1}()$ representa la función de distribución acumulada inversa. Dado que $F_D(n - \bar{n}^*)$ representa la probabilidad de que la demanda sea menor o igual a $n - \bar{n}^*$, el resultado anterior implica que con una probabilidad $\sqrt{\frac{c^c}{c^d}}$, el exceso de horas en el departamento será igual a \bar{n}^* o mayor. La expresión (4.7) es válida independiente de la distribución de probabilidades que se asuma para las demandas. Para analizar la capacidad explicativa de la expresión (4.7) asumiremos que la

demanda en el departamento sigue una distribución uniforme con parámetros a y b . En ese caso es posible obtener de (4.7) la siguiente expresión expandida:

$$\bar{n}^* = (b-a) \left[\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{c^c}{c^d}} \right]; \quad s.a \quad \sqrt{\frac{c^c}{c^d}} \leq \frac{1}{2}; c^d > 0 \quad (4.8)$$

La expresión (4.8) nos permite desprender nuevas conclusiones: (a) si $c^c \rightarrow 0$ ó $c^d \rightarrow \infty$, la cantidad óptima de horas polifuncionales tomará el valor máximo posible, es decir, $\bar{n}^* = (b-a)/2$; y (b) en cualquier otro caso, la cantidad óptima de horas polifuncionales será solo una fracción del valor máximo posible y este valor dependerá del largo del intervalo de variación de la demanda (i.e., $(b-a)$) ponderado por la razón entre los costos de capacitación y subdotación $\left(\sqrt{\frac{c^c}{c^d}} \right)$. Es decir, cuanto mayor sea la dispersión de la demanda mayor será el requerimiento por polifuncionalidad. Es importante notar, que si bien la metodología asume unas condiciones homogéneas en todos los departamentos para calcular la polifuncionalidad requerida de un departamento dado, el análisis para definir la polifuncionalidad de cada departamento se basa en la condición específica de dicho departamento (que se asume común a todos los demás). Así, es posible estimar la cantidad de horas polifuncionales en cada departamento sin necesidad de desarrollar análisis muy sofisticados. Sólo es preciso conocer las f.d.p de las demandas por requerimientos de personal en cada departamento.

b) Valor óptimo discreto de la polifuncionalidad

A través de un análisis de aproximación discreta, el objetivo de esta segunda subsección es desarrollar un algoritmo que determine específicamente la cantidad óptima de empleados polifuncionales requeridos por departamento (\bar{m}^*). Dado que asumimos que todos los empleados tienen el mismo tipo de contrato, el valor de \bar{m}^* puede ser calculado de forma aproximada por la razón $\frac{\bar{n}^*}{h}$. Sin embargo, $\frac{\bar{n}^*}{h}$ será la mayoría de las veces un valor continuo, pues \bar{n} es obtenido bajo un análisis continuo. Luego, si se asume que la

función del costo total esperado es cóncava hacia arriba, \bar{m}^* debe ser alguno de estos dos valores enteros $\left\lfloor \frac{\bar{n}^*}{h} \right\rfloor$ ó $\left\lceil \frac{\bar{n}^*}{h} \right\rceil$. El Algoritmo 1 es desarrollado para seleccionar correctamente la cantidad óptima de empleados polifuncionales requeridos por departamento.

Algoritmo 1: Rutina para encontrar la cantidad óptima de empleados polifuncionales por departamento

Fase 1: Inicialización

Paso 1: Ingresar información del algoritmo: $n_l, n_e, c^c, c^d, \mu_l, \mu_e$ tal que $n_l = n_e = n$ y $\mu_l = \mu_e = \mu = n$

Paso 2: Obtener \bar{n}^* de la expresión (4.7).

Fase 2: Resolución

Paso 3: Preguntar si $\bar{n}^* < h$. Si la condición se cumple ir al Paso 4, de otro modo ir al Paso 6.

Paso 4: Calcular CTW (tal que $\bar{n} = 0$) a partir de la expresión (4.4) y calcular CTP con $\bar{n} = h$ a partir de la expresión (4.6). Ir al Paso 5.

Paso 5: Comparar $CTW(\bar{n} = 0)$ y $CTP(\bar{n} = h)$. Elegir el valor de \bar{n} para el cual se obtenga el costo total esperado mínimo, sea $\bar{n} = \bar{n}'$. Ir a la Fase 3.

Paso 6: Calcular CTP con $\bar{n} = \left\lfloor \frac{\bar{n}^*}{h} \right\rfloor h$ y $\bar{n} = \left\lceil \frac{\bar{n}^*}{h} \right\rceil h$ a partir de la expresión (4.6). Ir al

Paso 7

Paso 7: Comparar $CTP\left(\bar{n} = \left\lfloor \frac{\bar{n}^*}{h} \right\rfloor h\right)$ y $CTP\left(\bar{n} = \left\lceil \frac{\bar{n}^*}{h} \right\rceil h\right)$. Elegir el valor de \bar{n} para el cual se obtenga el costo total esperado mínimo, sea $\bar{n} = \bar{n}'$. Ir a la Fase 3.

Fase 3: Término

Paso 8: Retornar la cantidad óptima de empleados polifuncionales haciendo $\bar{m}^* = \frac{\bar{n}'}{h}$

A modo de ejemplo, si $\bar{n}^* < h$ el Algoritmo 1 preguntará si $CTW(\bar{n} = 0) > CTP(\bar{n} = h)$. Si la condición se cumple, entonces hay beneficios por invertir en al menos un empleado polifuncional. De igual forma, si $\bar{n}^* \in (h, 2h)$ y si la condición $CTP(\bar{n} = h) > CTP(\bar{n} = 2h)$ se cumple, entonces es más beneficioso invertir en dos empleados polifuncionales que en solamente uno. Es importante notar, que bajo ciertas modificaciones, el Algoritmo 1 podría ser transformado en un algoritmo iterativo para obtener \bar{n}^* y \bar{m}^* , y así validar bajo un

análisis numérico la expresión analítica (4.7). Este análisis iterativo iniciaría estimando el valor de $CTW(\bar{n} = 0)$ y se detendría cuando se encuentre un valor de \bar{n} que minimice el costo total esperado o cuando $\bar{n} = n$, tal que $\bar{m}^* = \frac{\bar{n}^*}{h}$.

4.4.2. Etapa 2: Generación del conjunto atractivo de cadenas cerradas

Esta segunda etapa de la metodología usa como input la dotación óptima de empleados polifuncionales hallada en la etapa uno y posteriormente busca responder la tercera pregunta fundamental sobre la polifuncionalidad: ¿Cómo agregarla? El objetivo es determinar en qué departamento adicional va ser entrenado cada empleado polifuncional identificado en la etapa uno, mientras se construyen estructuras de polifuncionalidad tipo cadena cerrada. El enfoque de solución propone generar mediante heurísticas constructivas un conjunto atractivo de cadenas cerradas que deberían ser robustas ante la variabilidad de la demanda y entregar un buen desempeño a nivel costo-efectivo. Aunque estas heurísticas exploran un espacio muy reducido del conjunto de cadenas posibles de construir, la estrategia aquí, es que dada la gran cantidad de cadenas existentes, es posible alcanzar un buen nivel desempeño usando sólo las cadenas más evidentes e intuitivas. Brusco y Johns (1998) explican que hay múltiples soluciones al problema de selección de las estructuras de polifuncionalidad óptimas. Este resultado es muy valioso, pues indica que bajo un enfoque heurístico podríamos construir de manera más simple (i.e., sin hacer uso de modelos de optimización sofisticados) estructuras de polifuncionalidad robustas y costo-efectivas. Adicionalmente, este enfoque heurístico podría facilitar la implementación de determinadas estructuras de polifuncionalidad, mientras se inhibe el uso de otras menos atractivas a nivel práctico.

El enfoque de solución en esta etapa propone realizar un análisis conjunto de la tienda para determinar el conjunto atractivo de cadenas cerradas que lograría el mejor desempeño del sistema. A diferencia de la etapa uno, acá se considera que la tienda está conformada por distintos departamentos, cada uno de los cuales puede tener una dotación de personal diferente y una f.d.p de la demanda distinta. En un contexto de manufactura, Simchi-Levi y

Wei (2012) mostraron analíticamente para un sistema balanceado y con demanda estocástica, que las CLC son el diseño de polifuncionalidad óptimo entre todas las configuraciones con flexibilidad grado 2. También mostraron que varias CCC, donde cada CCC conecta un número sustancial de nodos de plantas y productos, se desempeñan tan bien como la CLC. Sin embargo, aunque Simchi-Levi y Wei (2012) focalizan su estudio en sistemas balanceados, también agregan que sus resultados deberían ser extensibles a sistemas desbalanceados. Su intuición es confirmada por el trabajo de Henao et al. (2015b), los cuales muestran los beneficios de usar CLC y CCC en sistemas desbalanceados y en un contexto de la industria del retail.

Apoyados en los resultados de ambos trabajos y usando reglas de decisión intuitivas, este estudio propone dos heurísticas para generar un conjunto atractivo de cadenas cerradas en un sistema desbalanceado. La primera heurística genera la cantidad mínima de cadenas cerradas posibles usando el concepto de CLC (ver Algoritmo 2 (A-CLC)). A diferencia de la primera heurística, la segunda de ellas genera la cantidad máxima de cadenas cerradas posibles usando el concepto de CR (ver Algoritmo 3 (A-CR)). La notación matemática usada en cada uno de los algoritmos es presentada a continuación:

Entradas:

- L Conjunto de departamentos, indizado por l
- R Conjunto de empleados polifuncionales, indizado por i (resultado de la Etapa 1)
- \bar{m}_l^* Cantidad óptima de empleados polifuncionales que pertenecen al departamento l , $\forall l \in L$, (resultado de la Etapa 1)
- μ_l Media de la demanda semanal del departamento l , $\forall l \in L$
- σ_l Desviación de la demanda semanal del departamento l , $\forall l \in L$
- CV_l Coeficiente de variación de la demanda semanal del departamento l , tal que $CV_l = \sigma_l / \mu_l$, $\forall l \in L$

Resultados:

- f_{ilk} Igual a 1 si el empleado polifuncional i del departamento l es entrenado para trabajar en el departamento k , de otra forma igual a 0; $\forall i \in R$ y $\forall l, k \in L: l \neq k$
- Ω Cantidad de cadenas generadas

Algoritmo 2: Rutina para generar cadenas largas cerradas (A-CLC)

Fase 1: Inicialización

Paso 1: Ingresar información del algoritmo: $\bar{m}_l^*, \mu_l, CV_l, \forall l \in L$

Fase 2: Generación de CLC

Paso 2: Tomar los empleados polifuncionales de cada departamento de la tienda y formar una colección S de subconjuntos. Cada conjunto $s \in S$ debe satisfacer las siguientes reglas:

- Contener la mayor cantidad posible de empleados polifuncionales. Pero no puede contener más de un empleado polifuncional del mismo departamento.
- $\sum_{s \in S} |s| = \sum_{l \in L} \bar{m}_l^*$. Garantiza que el conjunto de CLC construidas usen todo el personal polifuncional requerido por la Etapa 1.

Paso 3: Construir una CLC con cada conjunto $s \in S$. Se deben satisfacer las siguientes políticas simples.

- Para cada CLC crear arcos de entrenamiento (f_{ilk}) entre los departamentos con mayor CV . Si se asume que $CV_l = CV_k \forall l, k \in L: l \neq k$, en la CLC crear arcos de entrenamiento (f_{ilk}) entre los departamentos con mayor μ .
- En la medida de lo posible evitar repetir arcos de entrenamiento entre las CLC. Es decir, evitar $f_{ilk} = f_{jlh}, \forall i, j \in R: i \neq j$ y $\forall l, k, h \in L: k = h$.

Fase 3: Término

Paso 4: Retornar Ω y $f_{ilk}, \forall i \in R$ y $\forall l, k \in L: l \neq k$.

Finalmente, el desempeño de las cadenas A-CLC y A-CR, generadas a través del enfoque heurístico, es comparado con otras estructuras de polifuncionalidad diseñadas mediante un enfoque miope. En el enfoque miope, nosotros asumiremos, que el tomador de decisiones hará caso omiso de los resultados de la etapa uno, y tendrá un desconocimiento total sobre las f.d.p de las demandas de los departamentos de la tienda y

Algoritmo 3: Rutina para generar cadenas recíprocas (A-CR)

Fase 1: Inicialización

Paso 1: Ingresar información del algoritmo: $\bar{m}_l^*, \mu_l, CV_l, \forall l \in L$

Fase 2: Generación de CR

Paso 2: Tomar los empleados polifuncionales de cada departamento de la tienda y formar una colección S de subconjuntos. Cada conjunto $s \in S$ genera una CR y debe satisfacer las siguientes reglas y políticas simples:

- a. Contener exactamente dos empleados polifuncionales pertenecientes a distintos departamentos.
- b. Si \bar{m}_l^* y $|L|$ son números pares se debe satisfacer $\sum_{s \in S} |s| = \sum_{l \in L} \bar{m}_l^*$.
- c. Para cada CR crear arcos de entrenamiento (f_{ilk}) entre los departamentos con mayor CV . Si se asume que $CV_l = CV_k \forall l, k \in L: l \neq k$, en la CR crear arcos de entrenamiento (f_{ilk}) entre los departamentos con mayor μ .
- d. En la medida de lo posible evitar repetir arcos de entrenamiento entre las CR. Es decir, evitar $f_{ilk} = f_{jlh}, \forall i, j \in R: i \neq j$ y $\forall l, k, h \in L: k = h$.

Fase 3: Término

Paso 3: Retornar Ω y $f_{ilk}, \forall i \in R$ y $\forall l, k \in L: l \neq k$.

sobre los costos de capacitación y subdotación. Bajo el enfoque miope, un tomador de decisiones con un mínimo conocimiento en polifuncionalidad, generará las siguientes estructuras de polifuncionalidad: (a) Cero polifuncionalidad (CP), es decir, todos los empleados de la tienda son especializados y por lo tanto cada uno de ellos está capacitado para trabajar en un único departamento. (b) Una cadena larga cerrada (1CL), es decir, hay un empleado polifuncional por departamento formando una CLC. (c) Doble cadena larga (2CL), es decir, hay dos empleados polifuncionales por departamento formando dos CLC idénticas. (d) Triple cadena larga (3CL), es decir, hay tres empleados polifuncionales por departamento formando tres CLC idénticas. (e) Polifuncionalidad total (PT), es decir, cada empleado de la tienda está capacitado para trabajar en cualquier departamento. A manera de ejemplo, la Figura 4-2(a-e) compara las estructuras de polifuncionalidad bajo un enfoque miope. Las estructuras son construidas sobre un sistema desbalanceado con nueve

empleados y tres departamentos. En cada estructura, los nodos de oferta representan empleados polifuncionales y especialistas, y los nodos de demanda representan los departamentos de la tienda.

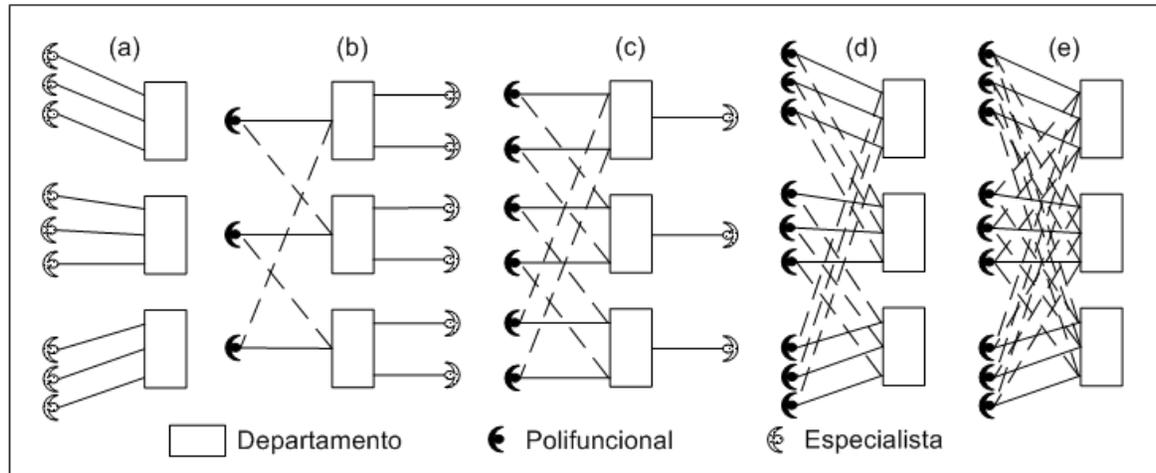


Figura 4-2: Comparación de estructuras de polifuncionalidad en el enfoque miope: (a) CP; (b) 1CL; (c) 2CL; (d) 3CL; y (e) PT

4.4.3. Etapa 3: Evaluación del desempeño y selección de las mejores estructuras de polifuncionalidad

Esta tercera etapa de la metodología usa como input las estructuras de polifuncionalidad generadas mediante los enfoques heurístico y miope en la etapa dos, y posteriormente compara sus desempeños para identificar las mejores entre ellas. El objetivo es identificar cuál o cuáles de las estructuras de polifuncionalidad construidas en la etapa dos son más robustas ante la variabilidad de la demanda y tienen mejor desempeño a nivel costo-efectivo. El enfoque de solución en esta etapa está dividido en tres partes.

En la primera parte, mediante Simulación Montecarlo se propone generar aleatoriamente, de acuerdo a una f.d.p elegida, un conjunto de M_l instancias de las demandas semanales para cada departamento l de la tienda, tal que $\cup N = \cup_{l \in L} M_l$ y

$|M_l| = |M_h| \quad \forall l, h \in L: l \neq h$. Posteriormente se define $k \in K$ como un escenario o subconjunto de N que contiene exactamente una realización de la demanda estocástica de cada departamento de la tienda, tal que $|k| = |L|$. La cardinalidad del conjunto de escenarios, esto es $|K|$, dependerá principalmente del nivel de precisión deseado en las métrica(s) de desempeño usada(s) para elegir las mejores estructuras de polifuncionalidad.

La segunda parte del enfoque de solución usa un MPL para evaluar el desempeño en los K escenarios de cada una de las estructuras de polifuncionalidad generadas en la etapa dos: (a) *Enfoque heurístico*: A-CLC, A-CR; y (b) *Enfoque miope*: CP, 1CL, 2CL, 3CL, PT. Sea P el conjunto de estructuras de polifuncionalidad conformado por estas siete estructuras. El MPL entrega la asignación óptima de horas de trabajo a un mix conocido de empleados especializados y polifuncionales en un horizonte de planificación semanal, para cada escenario de la demanda y estructura de polifuncionalidad. Por consiguiente, el MPL resuelve $|K| \times |P|$ problemas de asignación independientes. A continuación definimos los conjuntos, parámetros, variables y la correspondiente notación del MPL.

Conjuntos del modelo:

- I Empleados actuales, indizado en i
- L Departamentos de la tienda, indizado en l
- K Escenarios de la demanda, indizado en k
- P Estructuras de polifuncionalidad, indizado en p
- L_i Conjunto de habilidades adicionales en las que fue entrenado el empleado i ,
 $\forall i \in I$, tal que $|L_i| \leq 1$

Parámetros del modelo:

- c^d Costo de subdotación por hora (equivalente al costo esperado por ventas perdidas); [\$/Hora]
- c^c Costo semanal de capacitar a un empleado para trabajar en algún departamento;

| | |
|-----------|--|
| | [\$-sem/Empleado] |
| r_{lk} | Número de horas semanales que son requeridas en el departamento l y escenario de la demanda k , $\forall l \in L, k \in K$ |
| h | Cantidad de horas semanales que debe trabajar un empleado de acuerdo a su contrato |
| f_{ilp} | Igual a 1 si el empleado i está entrenado en el departamento l , bajo la estructura de polifuncionalidad p , de otra forma igual a 0, $\forall i \in I, l \in L, p \in P$. Los valores de f_{ilp} son obtenidos de la Etapa 2, y en conjunto entregan una matriz de polifuncionalidad que cambiará según sea la estructura de polifuncionalidad evaluada. |

Variables de decisión del modelo:

| | |
|-----------------|--|
| ω_{ilkp} | Cantidad de horas semanales asignadas a trabajar al empleado i en el departamento l , bajo el escenario de la demanda k , y estructura de polifuncionalidad p , $\forall i \in I, l \in L, k \in K, p \in P$ |
| κ_{lkp} | Subdotación en horas semanales en el departamento l , escenario de la demanda k , y estructura de polifuncionalidad p , $\forall l \in L, k \in K, p \in P$ |
| φ_{kp} | Costo total semanal de subdotación en el escenario de la demanda k y estructura de polifuncionalidad p , $\forall k \in K, p \in P$ |

El modelo de programación lineal para un escenario k y estructura de polifuncionalidad p es formulado a continuación:

$$\text{Min } \underbrace{\varphi_{kp}}_{(a)} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L_i} \underbrace{c^c}_{(b)} f_{ilp} \quad (4.9)$$

s.a.

$$\sum_{i \in I} \omega_{ilkp} + \kappa_{lkp} \geq r_{lk} \quad \forall l \in L, k \in K, p \in P \quad (4.10)$$

$$\sum_{l \in L} \omega_{ilkp} = h \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P \quad (4.11)$$

$$\omega_{ilkp} \leq hf_{ilp} \quad \forall i \in I, l \in L, k \in K, p \in P \quad (4.12)$$

$$\sum_{l \in L} c^d \kappa_{lkp} = \varphi_{kp} \quad \forall k \in K, p \in P \quad (4.13)$$

$$\omega_{ilkp} \geq 0 \quad \forall i \in I, l \in L, k \in K, p \in P \quad (4.14)$$

$$\kappa_{lkp} \geq 0 \quad \forall l \in L, k \in K, p \in P \quad (4.15)$$

$$\varphi_{kp} \geq 0 \quad \forall k \in K, p \in P \quad (4.16)$$

La función objetivo (FO) (4.9) minimiza los siguientes costos semanales: (a) subdotación; y (b) capacitación de empleados en habilidades adicionales. Notar que dado que la polifuncionalidad es un input en este modelo, los costos de capacitación corresponden a un costo fijo al inicio del horizonte de planificación. Las restricciones (4.10) y (4.15) producen el nivel de subdotación (no negativo) asociado a cada departamento, cada escenario de la demanda, y cada estructura de polifuncionalidad. Las restricciones (4.11) garantizan que los empleados trabajen exactamente la cantidad de horas semanales exigidas por su contrato. Las restricciones (4.12) aseguran que cada empleado sea asignado a trabajar en un departamento, si y sólo si está entrenado en ese departamento. Las restricciones (4.13) computan el costo total semanal de subdotación asociado a cada escenario de la demanda y estructura de polifuncionalidad. Finalmente, las restricciones (4.14) – (4.16) definen el dominio de cada variable del problema.

Sea $\psi_{kp} = \varphi_{kp}^* + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L_i} c^c f_{ilp}$ el costo total semanal obtenido bajo el escenario de la demanda k y la estructura de polifuncionalidad p , $\forall k \in K, p \in P$. Tal que $\bar{\psi}_p = \sum_{k \in K} \frac{\psi_{kp}}{|K|}$, $\forall p \in P$, es la métrica de desempeño que mide el costo total promedio semanal obtenido con la estructura de polifuncionalidad p . La tercera parte del enfoque de solución consiste en construir Intervalos de Confianza (IC) para cada métrica de desempeño $\bar{\psi}_p$ y realizar un test estadístico de comparación múltiple de medias. La comparación estadística entre

todos los pares de estructuras, equivalente a construir $|P|(|P|-1)/2$ intervalos de confianza, permitirá detectar las estructuras de polifuncionalidad significativamente distintas entre sí. Adicionalmente permitirá identificar aquellas estructuras que serán consideradas como soluciones de polifuncionalidad robustas ante la variabilidad de la demanda y que entregan el mejor desempeño a nivel costo-efectivo. Para ello se debe generar un conjunto K lo suficientemente grande que permita estimar $\bar{\psi}_p$, $\forall p \in P$ en estado estacionario y construir sus IC de manera precisa.

4.5. Resultados y discusión

Esta sección describe los experimentos realizados para evaluar el beneficio del encadenamiento en diferentes escenarios de prueba, y también presenta los resultados obtenidos bajo la metodología descrita en la sección anterior. La metodología fue aplicada sobre un caso de prueba hipotético pero realista a una tienda de Mejoramiento del Hogar en la ciudad de Santiago de Chile, sólo para personal de venta asistida. Un departamento es una unidad de negocio de la tienda y a ese nivel es donde se toman las decisiones de dotación de personal, entrenamiento, y asignación de empleados.

Todas las pruebas comparten las siguientes características:

1. Los parámetros de costo y los parámetros de las funciones de distribución de las demandas por requerimientos de personal en cada departamento fueron obtenidos a partir de información real suministrada por una tienda de retail de Santiago, Chile.
2. La demanda por horas hombres en cada departamento de la tienda se expresa semanalmente. Se asume que éstas demandas distribuyen de acuerdo a una función $N_l(\mu_l, \sigma_l^2)$, $\forall l \in L$.
3. Se considera un sólo tipo de contrato de trabajo, basados en las prácticas establecidas en el sector retail de Chile. Empleados *full-time* que trabajan 45 horas semanales (FT45).

4. Inicialmente cada empleado es especialista y por lo tanto sólo está entrenado para trabajar en un departamento de la tienda.

Con el objeto de identificar aquellas estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas cerradas que sean robustas ante la variabilidad de la demanda y también obtengan el mejor desempeño a nivel costo-efectivo, se realiza una comparación de los resultados obtenidos. Para realizar esta comparación, el análisis se centra en torno a métricas de desempeño que califican los costos incurridos y la inversión en polifuncionalidad requerida por cada estructura de polifuncionalidad. Las métricas utilizadas son las siguientes:

Costo total promedio semanal por estructura.

$$\bar{\psi}_p = \sum_{k \in K} \frac{\psi_{kp}}{|K|}, \quad \forall p \in P$$

Ahorro porcentual en la subdotación semanal por estructura. Sea $\bar{\varphi}_p = \sum_{k \in K} \frac{\varphi_{kp}}{|K|}$, $\forall p \in P$ el costo total promedio de subdotación semanal obtenido con la estructura de polifuncionalidad p . Entonces, la diferencia $(\bar{\varphi}_{CP} - \bar{\varphi}_{PT})$, representa la máxima disminución posible en el costo total promedio de subdotación semanal, que es obtenida al invertir en polifuncionalidad total. Definiremos el ahorro porcentual obtenido por la estructura p como:

$$\%AS_p = \frac{\bar{\varphi}_{CP} - \bar{\varphi}_p}{\bar{\varphi}_{CP} - \bar{\varphi}_{PT}} \cdot 100, \quad \forall p \in P$$

Porcentaje de empleados polifuncionales por estructura. Es decir, el número de empleados polifuncionales usados por la estructura de polifuncionalidad p , en relación al número total de empleados de la tienda.

$$\%EP_p = \frac{\text{Total_Empleados_Polifuncionales}}{|I|} \cdot 100, \quad \forall p \in P$$

Porcentaje de polifuncionalidad total por estructura. Por construcción sabemos que $|L_i| \leq 1, \forall i \in I$. Este indicador calcula el número de habilidades adicionales entrenadas en la estructura de polifuncionalidad p , en relación a la cantidad máxima teórica posible.

$$\%PT_p = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{l \in L_i} f_{ilp}}{|I| \cdot (|L| - 1)} \cdot 100, \quad \forall p \in P$$

Los resultados y la discusión del caso de prueba serán divididos en dos subsecciones establecidas bajo los siguientes encabezados: (4.5.1) ¿Dónde y cuánta polifuncionalidad agregar? y (4.5.2) ¿Cómo agregar la polifuncionalidad?

4.5.1. ¿Dónde y cuánta polifuncionalidad agregar?

En esta primera subsección se aplica la etapa uno de la metodología propuesta a través de la ejecución del Algoritmo 1. El Algoritmo 1 fue resuelto a través de hojas de cálculo convencionales, lo que muestra su alta aplicabilidad a nivel práctico. El objetivo de esta subsección es determinar qué tipo de departamentos requieren polifuncionalidad y cuáles serán los niveles óptimos de polifuncionalidad requeridos en cada uno de ellos (\bar{m}_i^*). En esta primera subsección nosotros consideramos una tienda de retail que cuenta con 10 Tamaños de Departamento (TD) distintos. Tal que 135, 180, 225, 270, 315, 360, 405, 450, 495, 540 son la dotación semanal en horas de cada TD. El primer TD cuenta con una dotación de 135 horas-sem (i.e., tres empleados), mientras que el décimo y último cuenta con una dotación 540 horas-sem (i.e., doce empleados). En consecuencia los 10 TD considerados difieren entre ellos, en la dotación de empleados especializados (n_l) y también en la media de la demanda asociada (μ_l). Sin embargo, nuestra metodología asume que $n_l = \mu_l, \forall l \in L$.

Por otra parte, a través de la expresión (4.7) sabemos que la cantidad óptima de polifuncionalidad en cada departamento dependerá fuertemente del valor de los parámetros que rijan la f.d.p de la demanda en cada uno de ellos (i.e., μ_l y $\sigma_l, \forall l \in L$) y también de la

estructura de costos considerada (i.e., c^c y c^d). Por lo tanto, para cada uno de los 10 TD fueron evaluados veinticuatro escenarios de prueba, o en total 240. Cada escenario corresponde a combinación distinta entre el coeficiente de variación de la demanda ($CV_i = \sigma_i / \mu_i$), y el costo de capacitación (c^c). Asumimos que c^d se mantiene fijo a través de todos escenarios de prueba. El caso de prueba considera entonces seis valores posibles para el coeficiente de variación de la demanda: 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%; y cuatro valores para el costo de capacitación semanal por empleado: 1, 30, 50, 200 [US\$ – sem / Empleado].

En relación a la estructura de costos considerada, cada uno de los 10 TD considerados tiene el mismo costo de subdotación ($c^d = \text{US\$}60/\text{hora}$). Con respecto al costo de capacitar a un empleado para trabajar en algún departamento (c^c), se asume igual para todos los departamentos. Inicialmente se asume con un valor mínimo, para obtener una cota máxima para el valor de polifuncionalidad por departamento. Sin embargo, luego es gradualmente aumentado con el propósito de ver el impacto del costo de capacitación en los niveles de polifuncionalidad óptimos para cada TD.

Los resultados de la aplicación del Algoritmo 1 son recopilados en la Tabla 4-2(a-d) para cada uno de los 240 escenarios establecidos previamente. La Tabla 4-2(a-d) muestra cómo la cantidad óptima de empleados polifuncionales (\bar{m}^*) aumenta gradualmente a medida que aumenta el %CV de la demanda y el TD, pero disminuye fuertemente ante aumentos en el costo de capacitación. Por ejemplo, la Tabla 4-2(a) muestra la cantidad óptima de empleados polifuncionales requeridos según la combinación del TD y del %CV de la demanda, cuando el costo de capacitación se asumió mínimo (i.e. $c^c = 1$). Vemos que aun cuando la capacitación es prácticamente gratis, se requiere solamente un empleado polifuncional por departamento entrenado en una habilidad adicional para minimizar el costo total esperado, si el %CV de la demanda es pequeño (i.e., %CV=5%). Este resultado es independiente del valor del TD. Sin embargo, cuando el %CV de las demanda es igual al máximo y el costo de capacitación es mínimo, los resultados indican que para cada TD se requiere una cantidad de empleados polifuncionales igual al tamaño de su dotación de

empleados. Esta cantidad corresponde al máximo teórico posible. Por otra parte, la Tabla 4-2(d) muestra que cuando el costo de capacitación es muy oneroso no es conveniente capacitar empleados si el %CV de la demanda es mínimo. Este resultado también es independiente del valor de TD. Sin embargo, cuando el %CV es diferente del mínimo, la polifuncionalidad será beneficiosa según el valor de TD. Por último, se puede inferir que aquellos departamentos cuya solución óptima indique $\bar{m}_i^* = 0$, para una determinada combinación $(c^c, c^d, TD, \%CV)$, no deberían pertenecer a ninguna cadena bajo tal escenario de los parámetros clave.

Tabla 4-2: Cantidad óptima de empleados polifuncionales (\bar{m}^*) según el costo de capacitación: (a) $c^c = 1$; (b) $c^c = 30$; (c) $c^c = 50$; y (d) $c^c = 200$

| | | (a) | | | | | | | | | | (b) | | | | | | | | | | |
|-----------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | TD | | | | | | | | | | TD | | | | | | | | | | |
| $c^c = 1$ | | 135 | 180 | 225 | 270 | 315 | 360 | 405 | 450 | 495 | 540 | $c^c = 30$ | 135 | 180 | 225 | 270 | 315 | 360 | 405 | 450 | 495 | 540 |
| %CV | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| | 20 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 30 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| | 40 | 3 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | 8 | 9 | 10 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 |
| 50 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 | 8 | |

| | | (c) | | | | | | | | | | (d) | | | | | | | | | | |
|------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | TD | | | | | | | | | | TD | | | | | | | | | | |
| $c^c = 50$ | | 135 | 180 | 225 | 270 | 315 | 360 | 405 | 450 | 495 | 540 | $c^c = 200$ | 135 | 180 | 225 | 270 | 315 | 360 | 405 | 450 | 495 | 540 |
| %CV | 5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 20 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 30 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | 40 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 50 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | |

4.5.2. ¿Cómo agregar la polifuncionalidad?

En esta segunda subsección se aplican las etapas dos y tres de la metodología propuesta a partir de los resultados obtenidos en la subsección 4.5.1. La aplicación de la etapa dos de la metodología se hace a través de la ejecución de los enfoques heurístico y miope. Para la ejecución del enfoque heurístico se hace uso de los Algoritmos 2 y 3. Una vez las

estructuras tipo cadenas son generadas mediante la etapa dos, ellas son evaluadas y comparadas a través del uso de simulación Montecarlo y del MPL (4.9)-(4.16). El MPL fue escrito en AMPL y los problemas fueron resueltos utilizando el software comercial ILOG CPLEX 12.4.0.1 ejecutándose en un PC Intel Core i5-2430M 2.4 GHz y 4.0 GB de RAM. El objetivo principal en esta subsección es identificar cuál o cuáles de las estructuras de polifuncionalidad que se construyan en la etapa dos son más robustas ante la variabilidad de la demanda y tienen mejor desempeño a nivel costo-efectivo.

Para la aplicación de las etapas dos y tres de la metodología consideramos una versión simplificada de una tienda de retail que cuenta con 6 departamentos y 30 empleados, tal que $|L|=6$ y $|I|=30$. Para el departamento 1 (D1), los parámetros son $n_1 = \bar{r}_1 = 315$ (i.e., siete empleados), mientras que para el resto de ellos son los siguientes: (D2), $n_2 = \bar{r}_2 = 225$; (D3), $n_3 = \bar{r}_3 = 135$; (D4), $n_4 = \bar{r}_4 = 135$; (D5), $n_5 = \bar{r}_5 = 180$; y (D6), $n_6 = \bar{r}_6 = 360$.

También con el propósito de simplificar el análisis consideramos sólo dos valores para el costo de capacitación; $c^c = 1$ y $c^c = 30$. Sin embargo, dado que nos interesa principalmente evaluar el desempeño del encadenamiento ante la variabilidad de la demanda, el caso de prueba sigue considerando seis valores posibles para el coeficiente de variación de la demanda: 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%. A partir de los resultados obtenidos en la subsección 4.5.1 (ver Tabla 4-2(a-b)), podemos construir la Tabla 4-3(a-b). La Tabla 4-3(a-b) muestra para cada costo de capacitación (c^c) y cada %CV de la demanda, la cantidad óptima de empleados polifuncionales requerida en cada departamento de la tienda (\bar{m}_i^*). De igual forma, la Tabla 4-3(a-b) muestra las métricas de inversión en polifuncionalidad asociadas a cada costo de capacitación y cada %CV de la demanda.

Los resultados y discusión de esta segunda subsección son subdivididos en dos apartados bajo los siguientes encabezados: (a) Generación de cadenas y (b) Evaluación de cadenas. El primer apartado está vinculado a la etapa dos de la metodología propuesta, mientras el segundo apartado está vinculado a la etapa tres.

Tabla 4-3: Cantidad óptima de empleados polifuncionales (\bar{m}^*) requerida en la tienda, según el costo de capacitación: (a) $c^c = 1$ y (b) $c^c = 30$

| | | (a) | | | | | | | | (b) | | | | | | | | |
|-----|-----------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | TD | | | | | | | | TD | | | | | | | | |
| %CV | $c^c = 1$ | 315 | 225 | 135 | 135 | 180 | 360 | %EP | %PT | $c^c = 30$ | 315 | 225 | 135 | 135 | 180 | 360 | %EP | %PT |
| | | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | | | | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | | |
| 5 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 20 | 4 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 20 | 4 |
| 10 | | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 27 | 5 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 20 | 4 |
| 20 | | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 40 | 8 | 20 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 27 | 5 |
| 30 | | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | 5 | 63 | 13 | 30 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 40 | 8 |
| 40 | | 6 | 4 | 3 | 3 | 3 | 7 | 87 | 17 | 40 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 57 | 11 |
| 50 | | 7 | 5 | 3 | 3 | 4 | 8 | 100 | 20 | 50 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | 5 | 63 | 13 |
| | | D1 D2 D3 D4 D5 D6 | | | | | | | | D1 D2 D3 D4 D5 D6 | | | | | | | | |
| | | Id del departamento | | | | | | | | Id del departamento | | | | | | | | |

a) Construcción de cadenas

Una vez calculada la cantidad óptima de empleados polifuncionales requerida en cada departamento de la tienda (\bar{m}_l^*), para cada costo de capacitación y para %CV de la demanda, se prosigue a aplicar la etapa dos de la metodología. Por simplicidad, se asumirá que todos los departamentos de la tienda tienen el mismo %CV de la demanda al momento de aplicar el encadenamiento. Es decir, se exige que cada cadena construida cumpla la siguiente condición: $\%CV_l = \%CV_k, \forall l, k \in L: l \neq k$. Posteriormente, para cada costo de capacitación (c^c) y cada %CV de la demanda, se ejecutan los Algoritmos 2 y 3 y se obtienen las estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas cerradas mediante el enfoque heurístico: A-CLC y A-CR. De igual forma, también se generan las estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas cerradas a través del enfoque miope: CP, 1CL, 2CL, 3CL, PT. En definitiva, los enfoques heurístico y miope son aplicados a un total de 12 escenarios de prueba, como resultado de cada combinación entre el costo de capacitación y el %CV.

En la Tabla 4-4 se presenta un ejemplo de cómo las cadenas cerradas son obtenidas a través de la implementación de cada uno de los dos algoritmos del enfoque heurístico, cuando el costo de capacitación es mínimo (*i.e.* $c^c = 1$) y el %CV de la demanda es igual a 30%. A modo de ejemplo, vemos que a partir de la heurística A-CLC se construyeron

cinco cadenas cerradas. Las dos primeras cadenas corresponden a CLC, mientras las tres restantes son CCC. Por otra parte, a partir de la Tabla 4-3(a) sabemos que sí $c^c = 1$ y $\%CV=30\%$ entonces $\sum_{i \in L} \bar{m}_i^* = 19$. Notar que la heurística A-CLC usa los diecinueve empleados polifuncionales para construir las cadenas cerradas. Sin embargo, para la estructura de la heurística A-CR sólo se pueden usar dieciocho empleados polifuncionales en este escenario. Finalmente, notar también que las dos heurísticas buscan en la medida de lo posible maximizar la flexibilidad y por lo tanto evitan repetir arcos de entrenamiento. Es decir, se trata de evitar que empleados polifuncionales pertenecientes a un departamento dado sean entrenados para trabajar en el mismo departamento adicional.

Tabla 4-4: Ejemplo de cadenas construidas bajo el enfoque heurístico con $c^c = 1$ y $\%CV = 30\%$

| Heurística | \bar{m}_i^* | | | | | | Cadenas construidas | %EP | %PT |
|------------|---------------|----|----|----|----|----|----------------------------------|-----|-----|
| | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | | | |
| A-CLC | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | D6 - D1 - D2 - D3 - D4 - D5 - D6 | 63% | 13% |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | D1 - D5 - D2 - D4 - D6 - D3 - D1 | | |
| | 1 | - | - | - | 1 | 1 | D6 - D5 - D1 - D6 | | |
| | - | 1 | - | - | - | 1 | D2 - D6 - D2 | | |
| | 1 | - | - | - | - | 1 | D1 - D6 - D1 | | |
| A-CR | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | D1 - D6 - D1 | 60% | 12% |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | D2 - D5 - D2 | | |
| | 1 | 1 | - | - | 1 | 1 | D3 - D6 - D3 | | |
| | 1 | 1 | - | - | 1 | 1 | D4 - D5 - D4 | | |
| | 1 | - | - | - | - | 1 | D1 - D5 - D1 | | |
| | 1 | - | - | - | - | 1 | D2 - D6 - D2 | | |
| | 1 | - | - | - | - | 1 | D1 - D6 - D1 | | |

De manera análoga, la Tabla 4-5 presenta un ejemplo de cómo las cadenas cerradas son obtenidas mediante el enfoque miope. La Tabla 4-5 no presenta CP y PT porque son estructuras de polifuncionalidad tradicionales y triviales para el lector. Por otra parte, es importante recordar que bajo el enfoque miope, nosotros asumimos que un tomador de decisiones hará caso omiso de los resultados de la subsección 4.5.1, y tendrá un desconocimiento total sobre las f.d.p de las demandas de los departamentos de la tienda y sobre los costos de capacitación y subdotación. Esto implica que para los 12 escenarios de prueba se usarán exactamente las mismas cadenas construidas y presentadas en la Tabla 4-5. Las Tablas 4-4 y 4-5 también muestran las métricas de inversión en polifuncionalidad asociadas a cada heurística implementada.

Tabla 4-5: Ejemplo de cadenas construidas bajo el enfoque miope

| Estructura | Polifuncionales | | | | | | Cadenas construidas | %EP | %PT |
|------------|-----------------|----|----|----|----|----|----------------------------------|-----|-----|
| | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | | | |
| 1CL | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | D6 - D1 - D2 - D3 - D4 - D5 - D6 | 20% | 4% |
| 2CL | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | D6 - D1 - D2 - D3 - D4 - D5 - D6 | 40% | 8% |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | D6 - D1 - D2 - D3 - D4 - D5 - D6 | | |
| 3CL | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | D6 - D1 - D2 - D3 - D4 - D5 - D6 | 60% | 12% |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | D6 - D1 - D2 - D3 - D4 - D5 - D6 | | |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | D6 - D1 - D2 - D3 - D4 - D5 - D6 | | |

b) Evaluación de cadenas

Una vez establecidos los 12 escenarios de prueba, se ejecuta la etapa tres de la metodología con el objetivo de evaluar y comparar el desempeño de las 7 estructuras de polifuncionalidad generadas para cada escenario (i.e., A-CLC, A-CR, CP, 1CL, 2CL, 3CL, PT). Los resultados de una gama de métricas de desempeño para cada escenario de prueba y estructura de polifuncionalidad son recopilados en las Tablas 4-6 y 4-7. La Tabla 4-6 recopila los resultados para los 6 escenarios que tienen costo de capacitación $c^c = 1$. De manera análoga, la Tabla 4-7 recopila los resultados para los restantes 6 escenarios que tienen costo de capacitación $c^c = 30$. Para calificar las estructuras de polifuncionalidad (E) en cada escenario, se incluyen métricas definidas anteriormente tales como: %EP, %PT, %AS, y $\bar{\psi}$. Otros resultados incluidos en las tablas son: (a) *Grupos homogéneos*, un test de comparación múltiple de medias ($\bar{\psi}$) para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. El método usado para discriminar entre las medias fue el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. En cada escenario, con un nivel de confianza del 95%, las estructuras de polifuncionalidad alineadas bajo una misma columna de X's corresponden a un grupo de estructuras que no muestran diferencias estadísticamente significativas entre sí. A su vez, cada columna de X's representa un grupo de estructuras de polifuncionalidad que sí muestra diferencias significativas con respecto a cualquier otra columna de X's. Finalmente, para cada escenario de prueba, la primera columna de X's muestra las estructuras de polifuncionalidad con mejor desempeño a nivel

costo-efectivo y que por lo tanto representan soluciones de polifuncionalidad robustas ante la variabilidad de la demanda. (b) *Precisión relativa* ($PR = \frac{t}{\bar{\psi}}$), representa el error relativo porcentual del largo del IC respecto a $\bar{\psi}$ (t : mitad del largo del IC). Es decir, a medida que el largo del IC sea más grande se tendrá menor precisión en la estimación de $\bar{\psi}$. Con el propósito de obtener estimaciones estadísticamente confiables, nosotros fijamos que el % PR deseado no debe ser mayor a un 7% en ningún caso. Por tal motivo, el tamaño de $|K|$ va aumentando paulatinamente a medida que aumenta el %CV de la demanda.

Tabla 4-6: Métricas de desempeño para $c^c = 1$

| E | % EP | % PT | % AS | $\bar{\psi}$ (US\$) | Grupos Homogéneos | PR (%) |
|-------------------------------|------|------|------|---------------------|-------------------|--------|
| $CV = 5\%, \quad K = 2000$ | | | | | | |
| A-CLC | 20 | 4 | 100 | 717 | X | 6 |
| 1CL | 20 | 4 | 100 | 717 | X | 6 |
| 2CL | 40 | 8 | 100 | 722 | X | 6 |
| 3CL | 60 | 12 | 100 | 728 | X | 6 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 860 | X | 6 |
| A-CR | 20 | 4 | 51 | 1 164 | X | 4 |
| CP | 0 | 0 | 0 | 1 627 | X | 3 |
| $CV = 10\%, \quad K = 2000$ | | | | | | |
| 2CL | 40 | 8 | 100 | 1 379 | X | 7 |
| 3CL | 60 | 12 | 100 | 1 384 | X | 7 |
| A-CLC | 27 | 5 | 99 | 1 392 | X | 7 |
| 1CL | 20 | 4 | 94 | 1 487 | X | 6 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 1 516 | X | 7 |
| A-CR | 27 | 5 | 78 | 1 784 | X | 5 |
| CP | 0 | 0 | 0 | 3 218 | X | 3 |
| $CV = 20\%, \quad K = 4000$ | | | | | | |
| 3CL | 60 | 12 | 99 | 2 787 | X | 5 |
| A-CLC | 40 | 8 | 98 | 2 840 | X X | 4 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 2 896 | X X | 5 |
| 2CL | 40 | 8 | 95 | 2 949 | X | 4 |
| A-CR | 40 | 8 | 79 | 3 537 | X | 4 |
| 1CL | 20 | 4 | 58 | 4 291 | X | 3 |
| CP | 0 | 0 | 0 | 6 371 | X | 2 |

| E | % EP | % PT | % AS | $\bar{\psi}$ (US\$) | Grupos Homogéneos | PR (%) |
|-------------------------------|------|------|------|---------------------|-------------------|--------|
| <i>CV</i> = 30%, $ K $ = 4000 | | | | | | |
| A-CLC | 63 | 13 | 99 | 4 299 | X | 5 |
| A-CR | 60 | 12 | 98 | 4 372 | X | 4 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 4 382 | X X | 5 |
| 3CL | 60 | 12 | 95 | 4 538 | X | 4 |
| 2CL | 40 | 8 | 83 | 5 161 | X | 4 |
| 1CL | 20 | 4 | 55 | 6 633 | X | 3 |
| CP | 0 | 0 | 0 | 9 612 | X | 2 |
| <i>CV</i> = 40%, $ K $ = 6000 | | | | | | |
| A-CLC | 87 | 17 | 99 | 5 785 | X | 4 |
| A-CR | 87 | 17 | 99 | 5 806 | X | 4 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 5 847 | X | 4 |
| 3CL | 60 | 12 | 87 | 6 681 | X | 3 |
| 2CL | 40 | 8 | 71 | 7 791 | X | 3 |
| 1CL | 20 | 4 | 44 | 9 713 | X | 2 |
| CP | 0 | 0 | 0 | 12 922 | X | 2 |
| <i>CV</i> = 50%, $ K $ = 8000 | | | | | | |
| A-CLC | 100 | 20 | 99 | 7 228 | X | 3 |
| A-CR | 100 | 20 | 99 | 7 251 | X | 3 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 7 264 | X | 3 |
| 3CL | 60 | 12 | 78 | 9 098 | X | 3 |
| 2CL | 40 | 8 | 62 | 10 597 | X | 2 |
| 1CL | 20 | 4 | 37 | 12 856 | X | 2 |
| CP | 0 | 0 | 0 | 16 205 | X | 1 |

Hay varios aspectos de los resultados dignos de destacar. Ambas tablas indican que en sistemas desbalanceados la estructura de polifuncionalidad A-CLC siempre pertenece al grupo de estructuras con menor costo total promedio incurrido (i.e., $\bar{\psi}$). De igual forma, en cada escenario la estructura de polifuncionalidad A-CLC se destaca por requerir la menor cantidad de inversión en polifuncionalidad (i.e., %EP y %PT) dentro de todo el grupo de estructuras con mínimo costo. Estos resultados son independientes de la combinación entre el %CV de la demanda y el costo de capacitación. Por otra parte, la estructura de polifuncionalidad A-CR sólo parece ser costo-efectiva cuando el costo de capacitación se asume mínimo y el %CV de la demanda es alto (i.e., %CV > 30%). Estos resultados son muy importantes, pues al igual que en sistemas balanceados, los resultados

muestran que las estructuras de polifuncionalidad que replican el concepto de CLC se presentan como el mejor diseño de polifuncionalidad entre todas las configuraciones con flexibilidad grado 2. No obstante, para sistemas desbalanceados, en lugar de usar una sola CLC, es posible que una combinación de CLC y CCC formen parte de la solución.

Tabla 4-7: Métricas de desempeño para $c^c = 30$

| E | % EP | % PT | % AS | $\bar{\psi}$ (US\$) | Grupos Homogéneos | PR (%) |
|-----------------------------|------|------|------|---------------------|-------------------|--------|
| <i>CV = 5%, K = 2000</i> | | | | | | |
| A-CLC | 20 | 4 | 100 | 891 | X | 6 |
| 1CL | 20 | 4 | 100 | 891 | X | 6 |
| 2CL | 40 | 8 | 100 | 1 070 | X | 6 |
| 3CL | 60 | 12 | 100 | 1 250 | X | 6 |
| A-CR | 20 | 4 | 51 | 1 338 | X | 4 |
| CP | 20 | 4 | 0 | 1 627 | X | 3 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 5 210 | X | 6 |
| <i>CV = 10%, K = 2000</i> | | | | | | |
| A-CLC | 20 | 4 | 94 | 1 661 | X | 6 |
| 1CL | 20 | 4 | 94 | 1 661 | X | 6 |
| 2CL | 40 | 8 | 100 | 1 727 | X | 7 |
| 3CL | 60 | 12 | 100 | 1 906 | X | 7 |
| A-CR | 20 | 4 | 51 | 2 446 | X | 4 |
| CP | 0 | 0 | 0 | 3 218 | X | 3 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 5 866 | X | 7 |
| <i>CV = 20%, K = 4000</i> | | | | | | |
| 2CL | 40 | 8 | 95 | 3 297 | X | 4 |
| 3CL | 60 | 12 | 99 | 3 309 | X | 5 |
| A-CLC | 27 | 5 | 89 | 3 378 | X | 4 |
| A-CR | 27 | 5 | 68 | 4 148 | X | 3 |
| 1CL | 20 | 4 | 58 | 4 465 | X | 3 |
| CP | 0 | 0 | 0 | 6 371 | X | 2 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 7 246 | X | 5 |
| <i>CV = 30%, K = 4000</i> | | | | | | |
| 3CL | 60 | 12 | 95 | 5 060 | X | 4 |
| A-CLC | 40 | 8 | 89 | 5 203 | X | 4 |
| 2CL | 40 | 8 | 83 | 5 509 | X | 4 |
| A-CR | 40 | 8 | 75 | 5 948 | X | 3 |
| 1CL | 20 | 4 | 55 | 6 807 | X | 3 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 8 732 | X | 5 |
| CP | 0 | 0 | 0 | 9 612 | X | 2 |

| E | % EP | % PT | % AS | $\bar{\psi}$ (US\$) | Grupos Homogéneos | PR (%) |
|-----------------------------|------|------|------|---------------------|-------------------|--------|
| <i>CV = 40%, K = 6000</i> | | | | | | |
| A-CLC | 57 | 11 | 92 | 6 774 | X | 3 |
| 3CL | 60 | 12 | 87 | 7 203 | X | 3 |
| A-CR | 53 | 11 | 85 | 7 291 | X | 3 |
| 2CL | 40 | 8 | 71 | 8 139 | X | 3 |
| 1CL | 20 | 4 | 44 | 9 887 | X | 2 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 10 197 | X | 4 |
| CP | 0 | 0 | 0 | 12 922 | X | 2 |
| <i>CV = 50%, K = 8000</i> | | | | | | |
| A-CLC | 63 | 13 | 89 | 8 687 | X | 3 |
| A-CR | 60 | 12 | 84 | 9 090 | X | 3 |
| 3CL | 60 | 12 | 78 | 9 620 | X | 3 |
| 2CL | 40 | 8 | 62 | 10 945 | X | 2 |
| PT | 100 | 100 | 100 | 11 614 | X | 3 |
| 1CL | 20 | 4 | 37 | 13 030 | X | 2 |
| CP | 0 | 0 | 0 | 16 205 | X | 1 |

También se mostró como el desempeño de la estructura A-CLC domina el desempeño obtenido por las estructuras de polifuncionalidad generadas mediante el enfoque miope. Es decir, aunque el enfoque miope también se basa en el concepto de CLC, este difiere del enfoque heurístico en que no diversifica la inversión en polifuncionalidad y sistemáticamente repite la misma CLC. Los resultados indican que para obtener los mejores rendimientos del encadenamiento, se debe procurar maximizar la flexibilidad cuando paulatinamente se incrementan los niveles de polifuncionalidad. Para maximizar la flexibilidad se debe evitar en la medida de lo posible repetir arcos de entrenamiento.

Finalmente, y para el caso donde el costo de capacitación se asume mínimo, la Figura 4-3 muestra cómo aumentan los niveles de polifuncionalidad requeridos (i.e., %EP y %PT) por la estructura de polifuncionalidad A-CLC, a medida que también aumenta el %CV de la demanda. Para cada %CV, la figura también registra cuál fue el porcentaje de ahorro en el costo total promedio de subdotación semanal obtenido mediante la estructura A-CLC (i.e., %AS). A partir de las Tablas 4-6 y 4-7 se observa que la estructura PT obtiene la

máxima disminución posible en el costo total promedio de subdotación semanal, tal que $\%AS_{PT} = 100\%$. Sin embargo, también exige la máxima inversión en polifuncionalidad, tal que $\%EP_{PT} = \%PT_{PT} = 100\%$. En contraposición, la estructura CP es el caso opuesto donde no hay inversión en polifuncionalidad y por lo tanto $\%EP_{CP} = \%PT_{CP} = \%AS_{CP} = 0\%$. Lo más interesante de la Figura 4-3, es que muestra claramente que aun cuando el costo de capacitación se asume mínimo, la estructura de polifuncionalidad A-CLC obtiene casi el 100% de los beneficios potencialmente alcanzables por el uso de la polifuncionalidad total, pero haciendo una inversión en polifuncionalidad mucho menor.

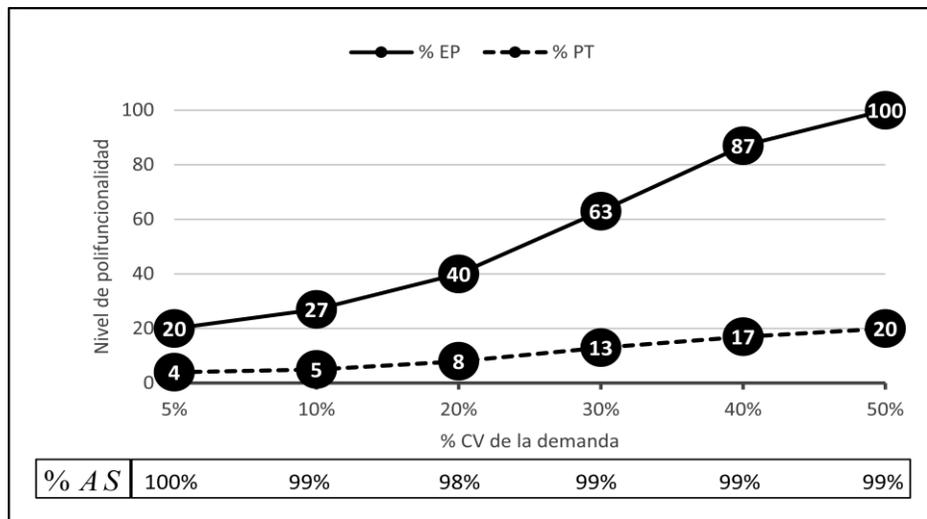


Figura 4-3: Desempeño y niveles de polifuncionalidad alcanzados con la estructura A-CLC para cada %CV de la demanda. Caso $c^c = 1$

4.6. Conclusiones y futura investigación

Nuestros resultados brindan una base para el diseño de políticas de polifuncionalidad que sean atractivas y viables para las industrias del sector servicios. Dichas políticas van dirigidas a responder tres preguntas fundamentales: Dónde, cuánto, y cómo agregar la polifuncionalidad. Respecto a la primera pregunta – dónde agregar la polifuncionalidad – los resultados mostraron que aquellas actividades cuyas demandas tengan una varianza

igual a cero no requerirán personal polifuncional y por lo tanto no deberían ser incluidas en una posible cadena de actividades. Sin embargo, a medida que la media y el coeficiente de variación de la demanda de una actividad son mayores, más altos también serán los beneficios por incrementar la dotación polifuncional de esa actividad e incluirla en estructuras de polifuncionalidad que repliquen el concepto de cadena larga cerrada.

Para la segunda pregunta – cuánta polifuncionalidad agregar – este trabajo entrega una expresión analítica para calcular de manera aproximada la cantidad óptima de empleados polifuncionales por actividad que minimice el costo total esperado. De acuerdo a la distribución de probabilidades de las demandas por actividades y a la estructura de costos del sistema modelado, los tomadores de decisiones reciben una herramienta simple y útil para estimar la dotación de empleados polifuncionales y especializados para cada actividad del sistema. Los resultados mostraron que aun cuando el costo de capacitación se asuma a un nivel mínimo, no es necesario tener una configuración con polifuncionalidad total para alcanzar el máximo beneficio posible. Nosotros modelamos estructuras de polifuncionalidad donde los empleados polifuncionales están capacitados para trabajar en sólo dos actividades. También asumimos en la metodología que las demandas por actividad son estocásticas e independientes.

Respecto a la tercera y última pregunta – cómo agregar la polifuncionalidad – los resultados mostraron que la mejor forma de agregar polifuncionalidad es generando estructuras de dotación de personal que combinen personal polifuncional con personal especializado. Adicionalmente, al igual que en sistemas balanceados, los resultados indican que las estructuras de polifuncionalidad que replican el concepto de cadena larga cerrada se presentan como el mejor diseño de polifuncionalidad entre todas las configuraciones con flexibilidad grado 2. No obstante, para sistemas desbalanceados, en lugar de usar una sola cadena larga cerrada, es posible que una combinación de cadenas largas cerradas y cadenas cortas cerradas formen parte de la solución. Finalmente, los mejores rendimientos del encadenamiento se obtienen cuando se maximiza la flexibilidad, esto es, cuando se evita repetir en la medida de lo posible los mismos arcos de entrenamiento.

Trabajos futuros en esta área podrían buscar levantar supuestos realizados en la modelación e incorporar los siguientes elementos: (1) Considerar el efecto que tiene el ausentismo no programado de personal en la modelación de los beneficios del encadenamiento. (2) Considerar costos de subdotación y capacitación diferentes por departamento. (3) Considerar la existencia de correlación entre las demandas por actividades del sistema. La polifuncionalidad puede ser altamente efectiva en cubrir las curvas de demanda, para dos o más actividades que estén correlacionados negativamente. En contraposición, será poco efectiva cuando las demandas por actividades se correlacionen positivamente.

4.7. Apéndice A: Probabilidad de subdotación por departamento cuando $\bar{n} > 0$

Dada \bar{n} , la cantidad de horas polifuncionales del departamento espejo capacitadas para trabajar en el departamento l , se puede obtener la probabilidad de que la subdotación sea alrededor de x en el departamento l . Se considera que todos los escenarios posibles para la realización de la subdotación en el departamento l ocurren en:

1. *El departamento espejo no puede prestar horas polifuncionales:* Con una demanda en el departamento l alrededor de $n+x$, y el departamento espejo e sin horas polifuncionales disponibles para prestar, la subdotación resulta en

$$f_{D_l}(n_l + x)[1 - F_{D_e}(n_e)] \quad (4.A1)$$

2. *El departamento espejo presta parcialmente horas polifuncionales:* Con una demanda en el departamento l alrededor de $n+y+x$, donde $0 \leq y \leq \bar{n}$, y el departamento espejo e con exactamente y horas polifuncionales disponibles para prestar, la subdotación resulta en

$$\int_{y=0}^{\bar{n}} f_{D_l}(n_l + y + x)f_{D_e}(n_e - y)dy \quad (4.A2)$$

3. *El departamento espejo presta todas sus horas polifuncionales:* Con una demanda en el departamento l alrededor de $n + \bar{n} + x$, y el departamento espejo e con todas sus horas polifuncionales disponibles para prestar, la subdotación resulta en

$$f_{D_l}(n_l + \bar{n} + x)F_{D_e}(n_e - \bar{n}) \quad (4.A3)$$

Adicionalmente, nuestro estudio asume en la etapa uno de la metodología que ambos departamentos son idénticos, esto es: (a) la dotación de personal es igual, es decir, $n_l = n_e = n$; y (b) las demandas semanales por departamento tienen la misma f.d.p, es decir, $D_l = D_e = D$. Luego, dado que $\bar{n} > 0$ y usando las expresiones (4.A1)-(4.A3), podemos calcular la probabilidad de que la subdotación sea alrededor de x en el departamento l , como:

$$\begin{aligned} f_{s(\bar{n})}(x) = & f_D(n+x)[1-F_D(n)] \\ & + \int_{y=0}^{\bar{n}} f_D(n+y+x)f_D(n-y)dy \\ & + f_D(n+\bar{n}+x)F_D(n-\bar{n}) \end{aligned} \quad (4.A4)$$

4.8. Apéndice B. Expresión analítica para el valor óptimo continuo de la polifuncionalidad (\bar{n}^*) por departamento: caso distribución normal

Suponemos inicialmente que las f.d.p de las demandas por departamento distribuyen $N(\mu, \sigma^2)$. Bajo este supuesto y refiriéndonos a la expresión (4.6), el costo total esperado semanal por departamento está dado por:

$$\begin{aligned}
CTP(\bar{n}) = & c^d \left[\int_{x=0}^{\infty} f_D(n+x)[1-F_D(n)]xdx \right. \\
& + \int_{x=0}^{\infty} \int_{y=0}^{\bar{n}} f_D(n+y+x)f_D(n-y)xdydx \\
& \left. + \int_{x=0}^{\infty} f_D(n+\bar{n}+x)F_D(n-\bar{n})xdx \right] + c^c \bar{n}
\end{aligned}$$

Se puede encontrar el valor óptimo \bar{n}^* que minimiza el costo total esperado resolviendo $\frac{\partial CTP(\bar{n})}{\partial \bar{n}} = 0$, veamos:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial CTP(\bar{n})}{\partial \bar{n}} = & c^c + c^d \int_{x=0}^{\infty} \left[0 + f_D(n+\bar{n}^*+x)f_D(n-\bar{n}) \right. \\
& \left. + (f'_D(n+\bar{n}^*+x)F_D(n-\bar{n}^*) - f_D(n+\bar{n}^*+x)F'_D(n-\bar{n}^*)) \right] xdx \quad (4.B1)
\end{aligned}$$

Reemplazando $F'_D(n-\bar{n}^*) = f_D(n-\bar{n}^*)$ en (4.B1), ya que la derivada de la f.a.p de la demanda es igual a su f.d.p, obtenemos la siguiente expresión simplificada:

$$\frac{\partial CTP(\bar{n})}{\partial \bar{n}} = c^c + c^d F_D(n-\bar{n}^*) \int_{x=0}^{\infty} f'_D(n+\bar{n}^*+x)xdx = 0 \quad (4.B2)$$

Aplicando integración por partes a la integral impropia, $\int_{x=0}^{\infty} f'_D(n+\bar{n}^*+x)xdx$, obtenemos la siguiente expresión:

$$\int_{x=0}^{\infty} f'_D(n+\bar{n}^*+x)xdx = \left(\lim_{x \rightarrow \infty} f_D(n+\bar{n}^*+x)x \right) - \int_{x=0}^{\infty} f_D(n+\bar{n}^*+x)dx \quad (4.B3)$$

Reemplazando (4.B3) en (4.B2) obtenemos la siguiente expresión expandida para (4.B2):

$$\frac{\partial CTP(\bar{n})}{\partial \bar{n}} = c^c + c^d F_D(n - \bar{n}^*) \left[\left(\lim_{x \rightarrow \infty} f_D(n + \bar{n}^* + x)x \right) - \int_{x=0}^{\infty} f_D(n + \bar{n}^* + x) dx \right] = 0 \quad (4.B4)$$

Se puede demostrar que $\lim_{x \rightarrow \infty} f_D(n + \bar{n}^* + x)x = 0$. Adicionalmente, también sabemos que

$\int_{x=0}^{\infty} f_D(n + \bar{n}^* + x) dx = 1 - F_D(n + \bar{n}^*)$. Por lo tanto, reemplazando estos resultados en (4.B4) obtenemos la expresión (4.B5).

$$\frac{\partial CTP(\bar{n})}{\partial \bar{n}} = c^c + c^d F_D(n - \bar{n}^*) [F_D(n + \bar{n}^*) - 1] = 0 \quad (4.B5)$$

Ahora, este estudio asume que hay total equilibrio entre la oferta en horas y la demanda promedio en horas de cada departamento (i.e., $n = \mu$). En otras palabras, las f.d.p de las demandas por departamentos son simétricas en relación a su valor medio n , y esto implica que $F_D(n + \bar{n}^*) = 1 - F_D(n - \bar{n}^*)$. Reemplazando este resultado en (4.B5), obtenemos la siguiente expresión analítica para el valor óptimo continuo de polifuncionalidad (\bar{n}^*) que minimiza el costo total esperado de un departamento cualquiera.

$$F_D(n - \bar{n}^*) = \sqrt{\frac{c^c}{c^d}} \quad \therefore \quad \bar{n}^* = n - \Phi^{-1} \left(\sqrt{\frac{c^c}{c^d}} \right); \quad t.q \quad c^c \leq c^d; c^d > 0 \quad (4.B6)$$

5. CONCLUSIONES

Este capítulo resume los resultados de esta tesis, propone políticas para implementar la polifuncionalidad en empresas del sector servicios, y sugiere ideas para futura investigación.

5.1. Resumen de resultados

El objetivo general de esta tesis doctoral fue desarrollar una metodología que permita diseñar una fuerza laboral polifuncional costo-efectiva a nivel estratégico, y entregar políticas de polifuncionalidad a las empresas del sector servicios que faciliten una eficiente operación a mediano plazo, y una adecuada mitigación de los efectos negativos de la subdotación y sobredotación de personal. Estos problemas de gestión de personal son ocasionados por fenómenos predecibles como la estacionalidad de la demanda, y no predecibles como su variabilidad y el ausentismo no programado de personal. La metodología de investigación se apoyó en distintos enfoques de solución de investigación operativa y validó las hipótesis de trabajo a través de tres artículos científicos. En cada artículo la metodología de solución empleó información real de una tienda de retail, y la formulación propuesta fue aplicada a una tienda de Mejoramiento del Hogar en la ciudad de Santiago de Chile.

El primer artículo propuso una estrategia híbrida de flexibilidad laboral para minimizar el descalce entre la demanda y la oferta laboral ocasionado por la fuerte estacionalidad de la demanda. La estrategia de flexibilidad híbrida tiene como componente principal el uso de personal polifuncional y también considera estrategias tradicionales como el uso de contratos flexibles y el uso de un sistema de programación de turnos para aprovechar esta flexibilidad. Este primer estudio no considera la variabilidad de la demanda y tampoco incorpora en el análisis estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas cerradas. El enfoque es un modelo de programación lineal entera mixta que simultáneamente asigna turnos de trabajo dentro de un horizonte de corto plazo y diseña un plan de capacitación asociado para una fuerza laboral conocida y que inicialmente sólo es especializada. Una característica destacable de este trabajo, es que permite dar respuestas a preguntas

asociadas a un nivel estratégico de la gestión de los recursos humanos, pero también a preguntas asociadas a un nivel táctico. Es decir, las decisiones estratégicas sobre la inversión y el uso de la polifuncionalidad están alineadas con la factibilidad de las decisiones tácticas de programación de turnos de trabajo y asignación de días de descanso.

Este primer artículo también evaluó el efecto de la polifuncionalidad sobre la composición de la dotación de personal y los contratos. Los resultados mostraron que es preferible dotar de polifuncionalidad a empleados que permitan una alta flexibilidad respecto de la forma de distribuir sus horas de trabajo a lo largo de la semana, como es el caso en este estudio de los empleados con contrato *part-time* de 30 horas. Sin embargo, contratos altamente flexibles pero que ofrezcan poca cantidad de horas laborales semanales no son tan atractivos para invertir en polifuncionalidad, como es el caso del contrato *part-time* de 20 horas. También se concluyó que los empleados polifuncionales podrían ser una alternativa más económica que incrementar la contratación de personal *part-time* para mejorar los niveles de cobertura de la demanda total, dependiendo de los costos de capacitar al personal vigente versus los de contratar personal *part-time*. Los resultados muestran que la polifuncionalidad y los contratos *part-time* son fuentes complementarias de flexibilidad en la solución del problema de programación de personal y la gestión de los recursos humanos para las empresas del sector servicios.

El segundo y tercer artículo propusieron una estrategia de flexibilidad laboral que se basa sólo en el uso de personal polifuncional para minimizar el descalce entre la oferta laboral y la demanda. A diferencia del primer artículo, estos dos trabajos no se concentran en estudiar el impacto negativo de la estacionalidad de la demanda. Sin embargo, ambos trabajos consideran distintos niveles de variabilidad de la demanda e incorporan el uso de cadenas cerradas para evaluar los beneficios de la polifuncionalidad. En particular, ambos trabajos se centran en obtener soluciones de polifuncionalidad tipo cadenas cerradas que sean robustas, esto es, soluciones costo-efectivas que provean un buen desempeño para diferentes escenarios de la variabilidad de la demanda. De igual forma, ambos estudios se preocupan por dar respuestas a preguntas asociadas sólo al nivel estratégico de la gestión de los recursos humanos.

En consecuencia, en estos dos estudios se simplifica el sub-problema de programación semanal de turnos a un sub-problema de asignación simple de empleados. Una de las características más destacables en ambos artículos, es que se focalizan en comprender mejor cómo el uso de estructuras tipo cadenas cerradas puede servir para abordar el problema de asignación de personal polifuncional en sistemas desbalanceados. Trabajos previos en el campo de investigación se han concentrado principalmente en sistemas balanceados, el cual es un caso particular del caso más general que se aborda en esta tesis. Por lo demás, independiente del sector productivo, la mayoría de los sistemas de asignación de recursos en el mundo son típicamente desbalanceados.

El enfoque propuesto en el segundo artículo fue un modelo de programación lineal entera mixta que simultáneamente responde las preguntas sobre polifuncionalidad. Esta formulación se diferencia del resto de los trabajos en la literatura, porque las restricciones del modelo matemático garantizan un plan de capacitación que entrega la cantidad óptima de empleados polifuncionales por actividad, mientras simultáneamente garantizan la formación de un conjunto de cadenas cerradas que requiere el mínimo número de entrenamientos. La metodología de solución también se apoya en una heurística constructiva para priorizar la construcción de cadenas cerradas largas, ya que estas estructuras de polifuncionalidad son las más atractivas. Finalmente, en este trabajo se incorpora de forma novedosa el enfoque de optimización robusta para incorporar explícitamente en la modelación matemática la incertidumbre de la demanda. Este enfoque conserva la estructura lineal del problema de optimización y no requiere conocimiento de la distribución de probabilidades de la demanda.

Una característica destacable del enfoque de optimización robusta, es que aunque es una metodología diseñada para dar soluciones en escenarios del peor caso, también incorpora un parámetro que permite controlar el nivel de aversión al riesgo de la solución. En nuestro estudio, fue posible identificar aquel nivel de aversión al riesgo que alcanza la mayoría de los beneficios potencialmente alcanzables por el uso de la polifuncionalidad total, pero haciendo una inversión en polifuncionalidad que es mucho menor a la exigida por la solución robusta con el nivel de aversión al riesgo máximo (i.e., escenario del peor caso).

Este tipo de análisis es muy útil para los tomadores de decisiones, pues les permite conocer como los distintos niveles de aversión al riesgo afectan las decisiones de inversión en polifuncionalidad y las métricas de desempeño asociadas a la operación efectiva del sistema.

El tercer artículo presentó una metodología nueva y simple para modelar los beneficios del encadenamiento en sistemas desbalanceados con demanda variable. La metodología propone una modelación continua de la fuerza laboral y separa el problema de polifuncionalidad en tres etapas. Las etapas fueron resueltas de forma secuencial. En la primera etapa, una ecuación cerrada obtiene la cantidad óptima aproximada de empleados polifuncionales por actividad, que minimiza el costo total esperado. De manera destacable, esta novedosa ecuación entrega los niveles de polifuncionalidad requeridos por actividad, sin la necesidad de que los tomadores de decisiones realicen análisis muy sofisticados. La hipótesis fundamental detrás de este análisis, es que es posible determinar una solución aproximada usando criterios de optimalidad local que asumen que las condiciones locales en una actividad son replicables en todas las demás actividades. En la segunda etapa, mediante heurísticas constructivas se genera un conjunto factible de cadenas cerradas, a partir de la dotación de empleados polifuncionales por actividad entregada en la etapa uno. En la tercera etapa, mediante simulación Montecarlo y un modelo de programación lineal, se evalúa el desempeño de las estructuras tipo cadenas construidas en la etapa dos. Adicionalmente, este trabajo permitió evaluar el trade-off entre los costos de inversión en polifuncionalidad y la mejoría en el nivel de servicio asociada a los ahorros en los costos de subdotación de personal.

El segundo y tercer artículo también presentan diferencias metodológicas. A diferencia del segundo artículo, en el tercer trabajo se asume conocimiento total de la función de densidad de probabilidad de la demanda en cada actividad del sistema. De igual manera, el tercer artículo sí realiza un trade-off entre los costos de capacitación y los costos de subdotación de personal. Por otra parte, el segundo artículo presenta una metodología de solución simultánea para determinar la cantidad requerida de empleados polifuncionales por actividad, mientras el tercer artículo propone una metodología de solución con un

análisis local y separado. Finalmente, una diferencia muy importante entre ambos trabajos, es que mientras el segundo artículo se basa en una metodología de optimización diseñada para dar soluciones en escenarios del peor caso, el tercer artículo se basa en un análisis analítico y probabilístico que entrega soluciones que minimizan un valor esperado. Sin embargo, aun cuando ambos enfoques tienen sustanciales diferencias metodológicas, es muy interesante observar cómo los resultados de ambos enfoques son similares. De hecho, ambos trabajos enriquecen las respuestas sobre polifuncionalidad y constituyen análisis complementarios.

5.2. Políticas de polifuncionalidad

El objetivo común de los tres artículos presentados en esta tesis fue brindar una base para establecer políticas de polifuncionalidad costo-efectivas y también atractivas de implementar en las industrias del sector servicios. Para lograr este objetivo, esta tesis se preocupó por modelar la polifuncionalidad como una variable de decisión. Esto permitió explorar un dominio más amplio de soluciones en comparación a un plan de entrenamiento exógeno y miope. La Tabla 5.1 presenta un resumen de los resultados y conclusiones obtenidos por esta investigación y que a su vez permiten a los tomadores de decisiones elaborar políticas que aborden las tres preguntas fundamentales sobre polifuncionalidad: dónde agregar la polifuncionalidad, cuánta agregar, y cómo debería ser agregada.

Tabla 5-1: Políticas para diseñar una fuerza laboral polifuncional en el sector servicios

| Pregunta | Políticas (P) |
|-------------------|---|
| ¿Dónde agregarla? | <p>P1. Hay dos casos extremos donde agregar polifuncionalidad no tiene valor. Primero, cuando hay sobredotación de personal en todas las actividades del sistema. Segundo, cuando los niveles de subdotación son muy altos en cada actividad y por lo tanto la oferta de personal en cada departamento es mucho menor a su propia demanda media.</p> <p>P2. En ausencia de estacionalidad en la demanda, aquellas actividades cuyas demandas tengan una varianza igual a cero no requerirán personal polifuncional y por lo tanto no deberían ser incluidas en una posible cadena de actividades.</p> |

| Pregunta | Políticas (P) |
|-------------------|---|
| ¿Dónde agregarla? | <p>P3. A medida que la media y el coeficiente de variación de la demanda de una actividad son mayores, más altos también serán los beneficios por incrementar la dotación polifuncional de esa actividad e incluirla en estructuras de polifuncionalidad que repliquen el concepto de cadena larga cerrada.</p> |
| ¿Cuánto agregar? | <p>P4. La cantidad de empleados polifuncionales requerida depende de la razón entre la oferta total y la demanda total por personal. A mayor desequilibrio en esa razón los requerimientos por polifuncionalidad son mayores.</p> <p>P5. La cantidad de empleados polifuncionales requerida aumenta gradualmente a medida que aumenta el nivel de variabilidad de la demanda. De hecho, estos aumentos son mayores para aquellas actividades con una demanda media mayor.</p> <p>P6. La cantidad de empleados polifuncionales requerida no sólo depende de la media y la desviación de la demanda, sino que también se ve sensiblemente afectada por la magnitud de los costos de capacitación y sub/sobredotación de personal.</p> <p>P7. Aun cuando el costo de capacitación se asuma a un nivel mínimo, no es necesario tener una configuración con polifuncionalidad total para alcanzar el máximo beneficio posible. Típicamente, basta con tener empleados polifuncionales capacitados para trabajar en sólo dos actividades.</p> <p>P8. Teóricamente, si los costos de capacitación tienden a cero y los costos de subdotación tienden a infinito, la cantidad de empleados polifuncionalidad tomará el valor máximo posible.</p> |
| ¿Cómo agregarla? | <p>P9. Las configuraciones de polifuncionalidad de mínimo costo se obtienen cuando la relación entre la oferta total y la demanda total están en equilibrio.</p> <p>P10. La mejor forma de agregar polifuncionalidad es generando estructuras de dotación de personal que combinen personal polifuncional con personal especializado.</p> <p>P11. Al igual que en sistemas balanceados, las estructuras de polifuncionalidad que replican el concepto de cadena larga cerrada se presentan como el mejor diseño de polifuncionalidad entre todas las configuraciones con 2-flexibilidad. Sin embargo, para sistemas desbalanceados, en lugar de usar una sola CLC, varias cadenas cerradas de diferentes largos forman parte de la solución.</p> <p>P12. Los mejores rendimientos del encadenamiento se obtienen cuando se maximiza la flexibilidad, esto es, cuando se evita repetir en la medida de lo posible arcos de entrenamiento.</p> |

5.3. Futura investigación

En el desarrollo de cada uno de los artículos presentados en esta tesis se hizo evidente que hay asuntos pendientes por atender o mejorar que pueden ser abordados en futuras investigaciones. Trabajos futuros en esta área podrían buscar levantar supuestos realizados en la modelación e incorporar los siguientes elementos:

1. Dada la estrecha relación entre los niveles de dotación de personal y la polifuncionalidad, se podría incorporar en la modelación matemática una variable de decisión que determine los niveles de dotación adicionales requeridos por tipo de contrato (*full-time*, *part-time*) y actividad. Esto permitiría explorar los beneficios de una política de flexibilidad híbrida.
2. El ausentismo no programado de personal es otra importante fuente de variabilidad que genera subdotación de personal. Sería interesante evaluar el efecto que tiene esta nueva fuente de variabilidad en los beneficios obtenidos por invertir en estructuras de polifuncionalidad tipo cadenas cerradas.
3. Dada la estrecha relación entre los niveles de polifuncionalidad requeridos y la estructura de costos del sistema, sería interesante considerar en la modelación distintos costos de subdotación, sobredotación, y capacitación por departamento.
4. Abandonar el supuesto de independencia entre las demandas por actividades en el sistema. La polifuncionalidad puede ser altamente efectiva en cubrir las curvas de demanda, para dos o más actividades que estén correlacionadas negativamente. En contraposición, será poco efectiva cuando las demandas por actividades se correlacionen positivamente. Un cambio estructural de este tipo, generará estructuras de polifuncionalidad que probablemente repliquen el concepto de cadenas cortas cerradas, en lugar de priorizar la construcción de cadenas largas cerradas.

5. En la industria del retail no es muy importante considerar mano de obra heterogénea en productividad porque el nivel de complejidad de las actividades no es tan alto y variado. Sin embargo, en otras industrias del sector servicios, probablemente sí sea interesante evaluar cómo son impactados los niveles de polifuncionalidad requeridos cuando la productividad individual de los empleados polifuncionales puede diferir según la actividad asignada.
6. Típicamente basta con tener empleados polifuncionales capacitados para trabajar en sólo dos actividades. Sin embargo, podría ser interesante explorar diseños de polifuncionalidad que consideren empleados polifuncionales entrenados en más de una habilidad adicional. Este tipo de diseño podría requerir menos empleados polifuncionales que el diseño tradicional y ser especialmente útil en sistemas con niveles bajos en la variabilidad de la demanda.
7. El problema de programación semanal de turnos de trabajo con polifuncionalidad resuelto en el primer artículo considera que el personal polifuncional puede ser asignado a un departamento diferente de la tienda en cada día de la semana. Esto puede ser definido como polifuncionalidad simple. Sin embargo, estudios posteriores podrían considerar una polifuncionalidad compleja. La cual permitiría que el personal polifuncional pueda ser asignado no sólo a distintos departamentos de la tienda sino incluso a departamentos de distintas tiendas. De hecho, los empleados polifuncionales podrían ser transferidos a distintos departamentos dentro de un mismo turno de trabajo.
8. En el primer artículo, también se asume implícitamente que los clientes que no fueron atendidos en cada periodo del día abandonan la tienda. En otras palabras, se asume que las demandas entre periodos consecutivos son independientes y la subdotación no se propaga a periodos sucesivos. En este trabajo, la no cobertura total de la demanda da origen al costo de subdotación, el cual está indirectamente relacionado con el nivel de servicio ofrecido a los clientes. Sin embargo, en algunos departamentos de la tienda, como es el caso del lineal de cajas de pago, la demanda observada de clientes que no

se satisfizo en un periodo, se acumula y típicamente debe ser cubierta en periodos subsiguientes. Por lo tanto, puede ser muy interesante incluir este efecto e incorporarlo en el modelo de optimización. El objetivo principal es modelar de manera más completa el componente de nivel de servicio, un elemento central en la oferta del sector servicios. Este nuevo modelo no solo se preocupará por maximizar la cobertura de la demanda, sino que también se hará cargo de controlar un largo de cola máximo pre-establecido por el tomador de decisiones. Este tipo de modelación da lugar a programas de turnos que nivelan el nivel de servicio a través del día, privilegiando la cobertura en periodos punta, y evitando la sobredotación en periodos valle.

BIBLIOGRAFÍA

- Abernathy, W.J., Baloff, N., Hershey, J.C. y Wandel, S. (1973). A three-stage manpower planning and scheduling model - A service-sector example. *Operations Research*, 21(3), 693-711.
- Agnihothri, S.R., Mishra, A.K. y Simmons, D.E. (2003). Workforce cross-training decisions in field service systems with two job types. *Journal of the Operational Research Society*, 54(4), 410-418.
- Aksin, O.Z., Karaesmen, F. y Ormeci, E.L. (2007). A review of workforce cross-training in call centers from an operations management perspective. In *Workforce Cross Training Handbook*, D. Nembhard (ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, 211-239.
- Alfares, H.K. (2004). Survey, categorization, and comparison of recent tour scheduling literature. *Annals of Operations Research*, 127(1-4), 145-175.
- Austin, W. (1977). Equity theory and social comparison processes. In J. M. Suls, & R. L. Miller (Eds.), *Social comparison processes: Theoretical and empirical perspectives*. Washington, DC: Hemisphere.
- Batta, R., Berman, O. y Wang, Q. (2007). Balancing staffing and switching costs in a service center with flexible servers. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 924-938.
- Ben-Tal, A. y Nemirovski, A. (1998). Robust convex optimization. *Mathematics of Operations Research*, 23(4), 769-805.
- Ben-Tal, A. y Nemirovski, A. (1999). Robust solutions of uncertain linear programs. *Operations Research Letters*, 25(1), 1-13.
- Ben-Tal, A. y Nemirovski, A. (2000). Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical Programming*, 88(3), 411-424.
- Bertsimas, D. y Sim, M. (2003). Robust discrete optimization and network flows. *Mathematical Programming*, 98(1-3), 49-71.
- Bertsimas, D. y Sim, M. (2004). The price of robustness. *Operations Research*, 52(1), 35-53.
- Bertsimas, D. y Thiele, A. (2006). A robust optimization approach to inventory theory. *Operations Research*, 54(1), 150-168.
- Beyer, H.G. y Sendhoff, B. (2007). Robust optimization - A comprehensive survey. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(33-34), 3190-3218.

- Billionnet, A. (1999). Integer programming to schedule a hierarchical workforce with variable demands. *European Journal of Operational Research*, 114(1), 105-114.
- Birge, J. y Louveaux, F. (2011). Introduction to stochastic programming. Springer, New York.
- Bohle, C., Maturana, S. y Vera, J. (2010). A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 245-252.
- Bokhorst, J.A.C., Slomp, J. y Molleman, E. (2004). Development and evaluation of cross-training policies for manufacturing teams. *IIE Transactions*, 36(10), 969-984.
- Brusco, M.J. y Johns, T.R. (1998). Staffing a multiskilled workforce with varying levels of productivity: an analysis of cross-training policies. *Decision Sciences*, 29(2), 499-515.
- Brusco, M. (2008). An exact algorithm for a workforce allocation problem with application to an analysis of cross-training policies. *IIE Transactions*, 40(5), 495-508.
- Cai, X. y Li, K.N. (2000). A genetic algorithm for scheduling staff of mixed skills under multi-criteria. *European Journal of Operational Research*, 125(2), 359-369.
- Campbell, G.M. (1999). Cross-utilization of workers whose capabilities differ. *Management Science*, 45(5), 722-732.
- Campbell, G.M. (2011). A two-stage stochastic program for scheduling and allocating cross-trained workers. *Journal of the Operational Research Society*, 62(6), 1038-1047.
- Chapados, N., Joliveau, M. y Rousseau, L.M. (2011). Retail store workforce scheduling by expected operating income maximization. In: T. Achterberg, J. Beck (eds.) *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*, *Lecture Notes in Computer Science*, 6697, 53-58
- Chou, M.C., Chua, G.A., Teo, C.P. y Zheng, H. (2010). Design for process flexibility: Efficiency of the long chain and sparse structure. *Operations Research*, 58(1), 43-58.
- Clark, J. (1993). Full flexibility and self-supervision in an automated factory. In J. Clark (Ed.), *Human resource management and technical change*, Broughton Gifford: Cornwell Press Ltd, UK, 116-136.
- Cuevas, R., Ferrer, J.C., Klapp, M. y Muñoz, J.C. (2015). A mixed integer programming approach to multi-skilled workforce scheduling. Aceptado en *Journal of Scheduling*. doi 10.1007/s10951-015-0450-0.

- Cuevas, R., Henao, C.A., Muñoz, J.C. y Ferrer, J.C. Simultaneous vehicle and crew scheduling problem: solving large real-world instances for public transport lines. *Trabajo en proceso*.
- Daganzo, C.F. (2005). *Logistics Systems Analysis* (4th edition). Springer, Berlin, Germany.
- Deng, T. (2013). *Process flexibility design in unbalanced and asymmetric networks* (Doctoral dissertation, University of California, Berkeley).
- Easton, F.F. (2011). Cross-training performance in flexible labor scheduling environments. *IIE Transactions*, 43(8), 589-603.
- Easton, F.F. y Rossin, D.F. (1996). A stochastic goal program for employee scheduling. *Decision Sciences*, 27(3), 541-568.
- Ernst, A., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Owens, B. y Sier, D. (2004a). An annotated bibliography of personnel scheduling and rostering. *Annals of Operations Research*, 127(1-4), 21-144.
- Ernst, A., Jiang, H., Krishnamoorthy, M. y Sier, D. (2004b). Staff scheduling and rostering: a review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research*, 153(1), 3-27.
- Fazakerley, G. M. (1976). A research report on the human aspects of group technology and cellular manufacture. *International Journal of Production Research*, 14(1), 123-134.
- Felan, J.T., Fry, T.D. y Philipoom, P.R. (1993). Labour flexibility and staffing levels in a dual-resources constrained job shop. *International Journal of Production Research*, 31(10), 2487-2506.
- Felan, J.T. y Fry, T.D. (2001). Multi-level heterogeneous worker flexibility in a dual resource constrained (DRC) job-shop. *International Journal of Production Research*, 39(14), 3041-3059.
- Gabrel, V., Murat, C. y Thiele, A. (2014). Recent advances in robust optimization: An overview. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 471-483.
- Gans, N., Koole, G. y Mandelbaum, A. (2003). Telephone call centers: a tutorial and literature review. *Manufacturing and Service Operations Management*, 5(2), 79-141.
- Graves, S.C. (2008). Flexibility principles. In *Building Intuition: Insights from Basic Operations Management Models and Principles*, Chap. 3, Springer, New York, 33-51.

- Henao, C.A., Muñoz, J.C. y Ferrer, J.C. (2015a). The impact of multi-skilling on personnel scheduling in the service sector: a retail industry case. *Journal of the Operational Research Society*, 66(12), 1949-1959. doi: 10.1057/jors.2015.9
- Henao, C.A., Ferrer, J.C., Muñoz, J.C. y Vera, J.A. (2015b). Multi-skilling with closed chains in the service sector: a robust optimization approach. Enviado a *International Journal of Production Economics*.
- Henao, C.A., Muñoz, J.C. y Ferrer, J.C. (2015c). Modeling the benefits of multi-skilling with closed chains in unbalanced systems. Bajo revision en *Management Science*.
- Hopp, W.J., Tekin, E. y Van Oyen, M.P. (2004). Benefits of skill chaining in serial production lines with cross-trained workers. *Management Science*, 50(1), 83-98.
- Inman, R.R., Jordan, W.C. y Blumenfeld, D.E. (2004). Chained cross-training of assembly line workers. *International Journal of Production Research*, 42(10), 1899-1910.
- Iravani, S., Van Oyen, M.P. y Sims, K. (2005). Structural flexibility: a new perspective on the design of manufacturing and service operations. *Management Science* 51(2), 151-166.
- Johannessen, J.A., Olsen, B. y Olaisen, J. (1997). Organizing for innovation. *Long Range Planning*, 30(1), 96-109.
- Jordan, W.C. y Graves, S.C. (1995). Principles on the benefits of manufacturing process flexibility. *Management Science*, 41(4), 577-594.
- Jordan, W.C., Inman, R.R. y Blumenfeld, D.E. (2004). Chained cross-training of workers for robust performance. *IIE Transactions*, 33(10), 953-967.
- Kabak, Ö., Ülengin, F., Aktas, E., Önsel, S. y Topcu, I. (2008). Efficient shift scheduling in the retail sector through two-stage optimization. *European Journal of Operational Research*, 184(1), 76-90.
- Kher, H.V. y Malhotra, M.K. (1994). Acquiring and operationalizing worker flexibility in dual resource constrained job shops with worker transfer delays and learning losses. *Omega*, 22(5), 521-533.
- Kim, S. y Nembhard, D.A. (2010). Cross-trained staffing levels with heterogeneous learning/forgetting. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 57(4), 560-574.
- Kouvelis, P. y Yu, G. (2013). Robust discrete optimization and its applications. (Vol. 14). Springer Science & Business Media.

- Mac-Vicar, M., Ferrer, J.C., Muñoz, J.C. y Henao, C.A. (2015). Real-time control on personnel scheduling in the retail industry. Bajo revisión en *European Journal of Operational Research*.
- Mattia, S., Rossi, F., Servilio, M. y Smriglio, S. (2014). Robust shift scheduling in call centers. In *Combinatorial Optimization* (pp. 336-346). Springer International Publishing.
- Molleman, E. y Slomp, J. (1999). Functional flexibility and team performance. *International Journal of Production Research*, 37(8), 1837-1858.
- Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J. y Zenios, S.A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research*, 43(2), 264-281.
- Paul, J.A. y MacDonald, L. (2014). Modeling the benefits of cross-training to address the nursing shortage. *International Journal of Production Economics*, 150, 83-95.
- Pennathur, A., Mital, A., Rajan, V., Kaber, D., Ray, P., Huston, R., Thompson, D., Markle, G., Pitman, M.A., Bishu, R., Crumpton, L., Deivanayagam, S., Fernandez, J., McElwee, M., McMulkin, M. y Sule, D. (1999). A framework for training workers in contemporary manufacturing environments. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 12(4), 291-310.
- Rong, A. (2010). Monthly tour scheduling models with mixed skills considering weekend off requirements. *Computers and Industrial Engineering*, 59(2), 334-343.
- Seckiner, S.U., Gokcen, H. y Kurt, M. (2007). An integer programming model for hierarchical workforce scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 694-699.
- Segal, M. (1974). The operator-scheduling problem: a network-flow approach. *Operations Research*, 22(4), 808-823.
- Simchi-Levi, D. (2010). *Operations Rules: Delivering Customer Value through Flexible Operations*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Simchi-Levi, D. y Wei, Y. (2012). Understanding the performance of the long chain and sparse designs in process flexibility. *Operations Research*, 60(5), 1125-1141.
- Slomp, J. y Molleman, E. (2002). Cross-training in policies and team performance. *International Journal of Production Research*, 40(5), 1193-1219.
- Slomp, J., Bokhorst, J.A.C. y Molleman, E. (2005). Cross-training in a cellular manufacturing environment. *Computers and Industrial Engineering*, 48(3), 609-624.
- Soyster, A. (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, 21(5), 1154-1157.

- Stewart, B.D., Webster, D.B., Ahmad, S. y Matson, J.O. (1994). Mathematical models for developing a flexible workforce. *International Journal of Production Economics*, 36(3), 243-254.
- Treleven, M. (1989). A review of dual resource constrained systems research. *IIE Transactions*, 21(3), 279-287.
- Van Den Bergh, J., Belien, J., De Bruecker, P., Demeulemeester, E. y De Boeck, L. (2013). Personnel scheduling: a literature review, *European Journal of Operational Research*, 226(3), 367-385.
- Varas, M., Maturana, S., Pascual, R., Vargas, I. y Vera, J. (2014). Scheduling production for a sawmill: A robust optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 150, 37-51.
- Wilke, H.A.M. y Meertens, R.W. (1994). *Group performance*, Routledge, London, UK.
- Yang, K.K. (2007). A comparison of cross-training policies in different job shops. *International Journal of Production Research*, 45(6), 1279-1295.