



Universidad de la República
Facultad de Ingeniería
Proyecto de Grado - Ingeniería de Producción

Supply Chain en Entornos de Cloud Manufacturing

Aplicación en la Industria Láctea Uruguaya

Agosto 2021

Autores:

Agustín Halty Rivero
Rodrigo Sánchez Varela
Valentín Vázquez Dalmás

Tutores:

Ing. Pedro Piñeyro
Ing. Daniel Rossit
Ing. Victor Viana

Resumen ejecutivo

En este informe se presenta el trabajo realizado sobre la aplicación de *Cloud Manufacturing* en la industria láctea uruguaya, más específicamente en la asignación de órdenes y planificación de tareas dentro de una agrupación de empresas.

El objetivo del proyecto fue lograr un primer acercamiento de la industria a este nuevo paradigma obteniendo una solución que optimice costos y tiempos de fabricación de las distintas órdenes.

Como primer paso hacia dicho objetivo, se relevó y analizó la literatura en torno a la aplicación de métodos matemáticos de resolución en problemas de *Cloud Manufacturing* vinculados a la asignación y planificación de órdenes.

Analizada la literatura, se plantearon dos modelos de programación entera mixta (MIP) que consideran varios de los aspectos fundamentales de la industria. A partir del primero de estos, se buscó abordar el problema de asignación de órdenes de fabricación, mientras que a través del segundo se pretendió encontrar una planificación óptima que minimice los distintos retrasos sobre las órdenes asignadas a cada una de las fábricas.

El desempeño de los modelos propuestos se evaluó a través de un escenario comparativo entre la solución obtenida a través de la integración de ambos modelos y la solución individual a la que cada fábrica hubiese llegado de haber trabajado de manera individual. Los resultados de dicho análisis mostraron que, de haber trabajado de manera individual, las fábricas no hubiesen sido capaces de satisfacer la demanda en el período considerado. En cambio, la solución obtenida a partir de los modelos propuestos permite que la totalidad de las órdenes sean fabricadas en el correr de dicho período. Por su parte, para examinar la solidez de los resultados, se llevaron a cabo una serie de análisis de sensibilidad sobre parámetros claves.

Se considera que el objetivo del proyecto fue alcanzado con éxito logrando una primera vinculación de la industria con este nuevo paradigma.

Palabras claves: *Cloud Manufacturing*, Cadena de Suministro, Asignación, Planificación, Programación Lineal Entera Mixta, *Scheduling*

Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecerles a nuestros tutores Pedro Piñeyro, Daniel Rossit y Víctor Viana por brindarnos la posibilidad de participar de este proyecto. No hay dudas que el tema tratado, desconocido por nosotros al inicio del camino, es un tema pujante a nivel mundial sobre el que cada día más científicos se interesan e intentan aportar para poder establecer su funcionamiento integral.

Agradecer también por el apoyo y motivación brindada en estos últimos quince, dieciséis meses, así como también por las vivencias transcurridas a lo largo del proyecto. Quizás no estaba en nuestros planes poder publicar un artículo en una revista internacional, como se logró en el transcurso de la tesis.

Está claro que fue un camino largo, de aprendizaje continuo, en el cual conocimos nuevas herramientas que nos permitieron alcanzar los distintos objetivos trazados para el éxito final del mismo.

A su vez, agradecer a la empresa con la cual trabajamos a lo largo del proyecto que, aún sin ser nombrada en el informe, fue una parte fundamental de todo este proceso. Nos brindaron acceso a mucha información simplemente por ayudar a un grupo de estudiantes de la Universidad de la República, sin buscar algo a cambio. Una actitud que vale la pena reconocer.

Por último, agradecer a nuestras familias y amigos que a pesar de la larga espera y del famoso “¿cuánto les falta?” se mantuvieron firmes a la espera de este momento.

Publicaciones Relacionadas

Halty, A., Sánchez, R., Vázquez, V., Viana, V., Piñeyro, P., & Rossit, D. A. (2020). Scheduling in cloud manufacturing systems: Recent systematic literature review. *Mathematical Biosciences and Engineering* 17(6), 7378–7397. <https://doi.org/10.3934/mbe.2020377>

Índice

| | |
|--|-----|
| 1. Introducción | 15 |
| 2. Marco Teórico..... | 17 |
| 2.1. Origen de Cloud Manufacturing | 17 |
| 2.2. Características de Cloud Manufacturing | 18 |
| 2.3. Aplicación de métodos de resolución en <i>Cloud Manufacturing</i> | 20 |
| 2.4. Industria láctea en Uruguay | 21 |
| 2.5. Contexto Mundial..... | 23 |
| 3. Empresa Láctea Utarg | 27 |
| 3.1. Descripción de la Empresa | 27 |
| 3.2. Operativa diaria | 28 |
| 3.3. Procesos Productivos | 29 |
| 3.4. Comercialización | 31 |
| 3.5. Alianzas comerciales | 31 |
| 4. Aplicación de Cloud Manufacturing en la Industria Láctea Uruguaya | 33 |
| 4.1. Situación Actual..... | 33 |
| 4.2. Motivación | 35 |
| 4.3. Descentralización de la producción | 36 |
| 4.4. Compartir Recursos..... | 36 |
| 4.5. Plataforma para la Aplicación de Cloud Manufacturing..... | 37 |
| 5. Sistema de asignación y planificación | 39 |
| 5.1. Descripción del problema | 39 |
| 5.2. Formulación del Modelo Matemático: Modelo de Asignación..... | 41 |
| 5.3. Formulación del Modelo Matemático: Modelo de Planificación | 60 |
| 5.4. Validación - Integración de Modelos | 70 |
| 6. Caso de Estudio | 77 |
| 6.1. Análisis de resultados..... | 79 |
| 6.2. Análisis de sensibilidad..... | 86 |
| 7. Conclusiones | 95 |
| Bibliografía | 97 |
| Anexo I: Estado del Arte..... | 101 |
| Anexo II: Validación de Modelos | 155 |
| Anexo III: Pruebas de Estrés..... | 167 |
| Anexo IV: Resultados Obtenidos..... | 171 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Concepto de Cloud Manufacturing. Fuente: Adamson et al. [5]..... | 19 |
| Figura 2. Participación de los diferentes rubros en las exportaciones del sector agroalimentario entre 2001-2017 [20]. | 22 |
| Figura 3. Variación de la población y superficie per cápita [20]. | 24 |
| Figura 4. Distribución de la captación de leche por industria láctea [21] | 34 |
| Figura 5. Integración del modelo de asignación y planificación..... | 41 |
| Figura 6. Plataforma de Cloud Manufacturing y sistema de Asignación | 42 |
| Figura 7. Entradas y Salidas del Proceso de Producción..... | 43 |
| Figura 8. Prueba de Estrés - Variación de fábricas, clientes y tambos..... | 60 |
| Figura 9. Mapa de Asignación de órdenes de clientes y tambos a la fábrica 1. | 80 |
| Figura 10. Efecto de la variación de los parámetros W_c y W_t en la función objetivo. ... | 88 |
| Figura 11: Efectos de la variación de los parámetros MT_{psr} en los cuellos de botella del sistema. | 90 |
| Figura 12. Efectos de la variación de la demanda media de los productos solicitados | 91 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-------------------------------|
| Tabla 1. Modelo de asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 1. | ¡Error! Marcador no definido. |
| Tabla 2. Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 2 | 54 |
| Tabla 3. Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 3. ... | 56 |
| Tabla 4. Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 4. ... | 58 |
| Tabla 5. Modelo de Planificación - Parámetros y Variables del caso de validación 1.. | 66 |
| Tabla 6. Modelo de Planificación - Parámetros y Variables del Caso de Validación 2. | 68 |
| Tabla 7. Modelo de Planificación - Parámetros y Variables del caso de validación 3.. | 69 |
| Tabla 8. Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación integral..... | 71 |
| Tabla 9. Modelo de Asignación - Capacidades ociosas en minutos para las tareas luego de la asignación. | 72 |
| Tabla 10. Modelo de Planificación - Parámetros y Variables del caso de validación Integración..... | 73 |
| Tabla 11. Capacidad de Producción por Fábrica | 78 |
| Tabla 12. Ubicación Fábricas, Tambos y Clientes | 78 |
| Tabla 13. Costos de fabricación de productos por fábrica..... | 79 |
| Tabla 14. Tiempo máximo de tarea por producto en cada fábrica..... | 79 |
| Tabla 15. Traslados de crema de leche entre fábricas..... | 80 |
| Tabla 16. Días necesarios para la fabricación de cada producto por fábrica..... | 81 |
| Tabla 17. Asignación de la leche de los tambos. | 82 |
| Tabla 18. Capacidad ociosa de las tareas para las distintas fábricas en el caso de estudio..... | 83 |
| Tabla 19. Órdenes asignadas a la fábrica 1..... | 83 |
| Tabla 20: Fecha de Entrega de las órdenes realizadas por los distintos clientes. | 84 |
| Tabla 21: Cantidad de producto atrasado al final de cada período (día) | 85 |
| Tabla 22: Capacidad Ociosa por tarea/período..... | 86 |
| Tabla 23: Cantidades de producto elaborados en cada período | 86 |
| Tabla 24. Análisis de Sensibilidad - Variación en los pesos ponderados de tiempo y costo..... | 88 |
| Tabla 25: Análisis de Sensibilidad - Variación en porcentaje mínimo de asignación de producción..... | 89 |
| Tabla 26. Análisis de Sensibilidad - Variación de la demanda media..... | 91 |
| Tabla 27. Comparación de la solución óptima obtenida en un sistema individual y uno integrado..... | 93 |

1. Introducción

En este documento se presenta el trabajo realizado sobre *Supply Chain* en entornos de *Cloud Manufacturing* en la industria láctea uruguaya. A lo largo de este informe, se presentan los principales conceptos de *Cloud Manufacturing* y una aplicación de estos en la industria láctea.

Para definir *Cloud Manufacturing*, se tomaron las definiciones de Wang et al. [1], Li et al. [2] y Liu et al. [3], en las que *Cloud Manufacturing* se define como un paradigma de fabricación, creado a partir de las ventajas de *Cloud Computing*.

En *Cloud Manufacturing* los servicios de producción o fabricación y los clientes que los demandan están vinculados por una plataforma virtual en la nube, generando relaciones entre agentes que anteriormente no estaban vinculados. De esta forma, los clientes tienen acceso a un número creciente de proveedores de servicios de fabricación, mientras que los proveedores de servicios tienen acceso a una mayor cantidad de clientes, en comparación a los que podrían obtener por sus propios medios.

En lo que refiere a la industria láctea uruguaya, y de acuerdo con datos de la FFDSAL (Fondo de Financiamiento y Desarrollo Sustentable de la Actividad Lechera), la principal empresa láctea del Uruguay capta el 70% de la leche procesada a nivel industrial [4].

A partir de esto, se estudió la posibilidad de aplicar, en un sector productivo importante a nivel país, las últimas tendencias de fabricación a nivel mundial, con la finalidad de que una parte de las empresas (que se reparten el 30% de la industria) puedan trabajar de manera conjunta. De esta manera, se busca maximizar sus capacidades y recursos, de una forma que ninguna habría podido lograr de haber trabajado de manera individual.

Consideramos relevante tomar en cuenta las nuevas tecnologías que se están aplicando a nivel mundial y que significarían un gran cambio para el sector industrial de Uruguay. Dichas tecnologías traen asociadas nuevos conceptos en los paradigmas de fabricación, entre los que se destacan compartir recursos de fabricación, así como afrontar la demanda en forma conjunta. Estas tecnologías permiten a las empresas tener trazabilidad de sus productos y fomentar la implementación de entregas *just-in-time*, que actualmente no es sencillo de aplicar por las características del proceso productivo.

El primer objetivo de este proyecto consistió en la realización de una revisión sistemática de la literatura, cuyos resultados se presentan en el estado del arte del presente documento (Anexo I). En el mismo se presenta el concepto de *Cloud Manufacturing* y se abordan distintos métodos cuantitativos aplicados a problemas de programación matemática en esta temática. Habiendo estudiado distintos artículos científicos se evidencia, en términos generales, la dificultad de lograr una aplicación completa de los conceptos correspondientes a este nuevo paradigma.

El segundo objetivo fue definir una situación hipotética en donde distintas empresas trabajen en conjunto bajo los lineamientos centrales de *Cloud Manufacturing*. Para esto, se centró el estudio en una empresa particular para la cual, por motivos de confidencialidad, se modifica el nombre y cierta información de esta.

Luego, a partir de esta situación hipotética, se desarrolló un sistema que permite optimizar en términos de costo y tiempo, la asignación y planificación de la producción. Para alcanzar dicho objetivo se propuso un primer modelo matemático para la asignación de las órdenes realizadas por los distintos clientes a las distintas fábricas. Este modelo, considera particularidades de la industria de forma de lograr un mayor

acercamiento a la realidad. Por su parte, el segundo modelo matemático desarrollado se enfocó en la planificación de las tareas de producción necesarias para cumplir con las órdenes asignadas por el modelo de asignación, minimizando los retrasos en las entregas a los clientes.

La asignación de órdenes consiste en distribuir las órdenes ingresadas por los distintos clientes (en el periodo de una semana) a las distintas fábricas. Considerando las órdenes a producir por cada fábrica determina qué tambos proveerán la materia prima para la elaboración de los productos, de forma de asegurar el cumplimiento de dichas órdenes en el período establecido. Culminado el proceso de asignación, se realiza la planificación de las tareas de producción para cada fábrica. Esta consiste en determinar la cantidad fabricar de cada producto a fabricar por día, con el objetivo de minimizar los retrasos con respecto a lo solicitado por los distintos clientes.

Con la finalidad de simular posibles escenarios y evaluar los resultados obtenidos, se realizó una evaluación numérica para los modelos presentados, en la que se destaca el análisis que demuestra los beneficios en la aplicación de un sistema de asignación. En dicho estudio se comparó un escenario donde las empresas comparten recursos y forman parte del sistema de asignación mencionado y otro en el que las empresas se rigen bajo paradigmas de fabricación tradicionales. En este último, las fábricas no comparten recursos y cada una tiene sus propios proveedores y clientes. Los resultados obtenidos indicaron que, en un escenario colaborativo donde se realiza una asignación por un agente externo, las fábricas pudieron cumplir con las órdenes de los clientes en el período establecido, mientras que en el otro escenario no les fue posible.

El resto del documento se encuentra organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta la problemática a abordar; en la Sección 3 se presenta información de la empresa en la que se realizó este estudio; en la Sección 4 se presentan los principales argumentos para la aplicación de *Cloud Manufacturing* en la industria láctea uruguaya; en la Sección 5 se presenta y desarrolla el sistema de asignación y planificación; en la Sección 6 se realiza la evaluación numérica de los modelos propuestos y así evaluar el sistema de asignación y planificación ante diferentes escenarios; en la Sección 7 se presentan las conclusiones y posibles mejoras para el desarrollo del sistema planteado.

2. Marco Teórico

Para comprender el surgimiento de *Cloud Manufacturing*, es relevante considerar los recientes desarrollos en la industria manufacturera. Estos desarrollos surgen no solo debido a las oportunidades que brindan los avances de la tecnología, sino también a la necesidad de mejorar la fabricación por distintas situaciones del contexto.

En esta sección se presenta el origen del concepto *Cloud Manufacturing* y sus características, la industria láctea uruguaya y el contexto de la fabricación de alimentos a nivel mundial.

2.1. Origen de Cloud Manufacturing

Como menciona Adamson et al. [5] la historia de los últimos 40 años ha mostrado distintas iniciativas, cuyo objetivo es derribar el paradigma clásico de la producción en masa. Dentro de dichas iniciativas, se incluyen la customización masiva y la manufactura inteligente, reconfigurable, ágil, geográficamente distribuida y sustentable, entre otros.

Estas iniciativas han marcado lo que se conoce como la cuarta revolución industrial (Industria 4.0), que tiene fuerte base en la Internet. La Industria 4.0 se basa en sistemas de producción ciber físicos, donde todos los procesos productivos son controlados por algoritmos integrados con internet. En las Industrias 4.0 la tecnología tiene un rol central, donde es muy importante la digitalización, el manejo de grandes volúmenes de datos y la inteligencia artificial. Lograr una aplicación completa de las Industrias 4.0 es sumamente complejo y pocos países lo han logrado [6].

Una de las principales tendencias que marca el sector de tecnología, es la que se define como *Cloud Computing*. Este modelo permite acceder, bajo demanda y a través de la red, a un conjunto de bienes compartidos y configurables permitiendo tener un amplio acceso a la red [7].

Con las nuevas tendencias y requerimientos de la fabricación industrial y las nuevas tecnologías, se propuso un nuevo paradigma de fabricación denominado *Cloud Manufacturing*. Entre las nuevas tendencias se distinguen la globalización, individualización, digitalización, colaboración e integración. Algunas de las tecnologías emergentes que impulsaron el surgimiento de este paradigma son, justamente, *Cloud Computing*, *Internet of Things (IoT)*, *Big Data Analytics* e inteligencia artificial [8].

A partir de la globalización y de los vínculos generados entre los distintos agentes involucrados en el proceso productivo, la coordinación y gestión de actividades se realiza de forma conjunta. De esta forma se logra una sinergia en la cual se maximiza el uso de capacidades y recursos, aportando habilidades y competencias que ninguno de los agentes hubiese tenido de forma individual. Esta idea es la base del concepto de *Cloud Manufacturing* [8].

Esta agrupación de recursos bajo demanda brinda la posibilidad de generar cadenas productivas que compartan recursos de más de un proveedor de servicios de producción, lo que conlleva a que la producción pueda realizarse en diferentes ubicaciones geográficas [9].

2.2. Características de Cloud Manufacturing

Tal como plantea Fisher et al. [10], *Cloud Manufacturing* podría definirse como un modelo de fabricación orientado a servicios, que virtualiza los recursos y capacidades de fabricación en servicios, a los que se accede a través de la nube. Esto transforma las líneas de suministro de fabricación, que dejan de ser fijas y pasan a ser temporales, proporcionando una mayor flexibilidad y escalabilidad. Esto resulta en una mayor resistencia y sostenibilidad durante todo el proceso de fabricación.

Tomando como guía lo que menciona Liu et al. [11], (esta flexibilidad en las configuraciones de producción reduce considerablemente los costos del ciclo de vida de los productos (un fabricante no tiene que desarrollar toda la tecnología de producción), así como la asignación óptima de servicio y órdenes de servicio.

Por su parte, se describe a *Cloud Manufacturing* como una plataforma multiusuario, inteligente y basada en el conocimiento, que puede proporcionar soluciones sostenibles a lo largo del ciclo de vida del producto. El proceso se mejora a través de una colaboración efectiva, minería de datos y comunicación a través de la red de desarrolladores, fabricantes y consumidores.

A su vez, Liu et al. [12] mantiene que el intercambio transparente y conveniente de una variedad de recursos de fabricación distribuidos geográficamente es mencionado como una de las características más destacadas de *Cloud Manufacturing*. El paradigma de fabricación basado en *Cloud Manufacturing* aprovecha la posibilidad de acceder, a través de la nube, a un conjunto de recursos de producción distribuidos o diversos, que se pueden agrupar bajo demanda. Se entiende por nube a la red de servidores remotos de todo el mundo que están conectados para funcionar como un único ecosistema [13].

Por su parte [5], destaca que el principio de funcionamiento es que los proveedores de servicios organicen y encapsulen los recursos y capacidades de fabricación de forma efectiva. De esta forma se logra que estos queden disponibles a los consumidores como servicios en una nube de fabricación, como se muestra en la Figura 1.

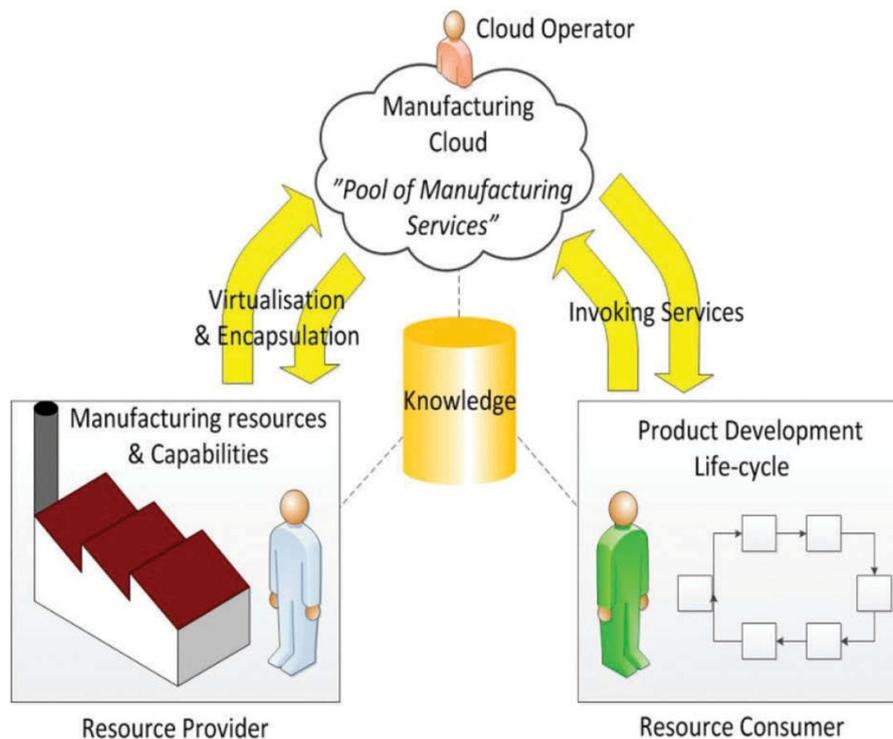


Figura 1. Concepto de Cloud Manufacturing. Fuente: Adamson et al. [5]

Al conocer las tareas encapsuladas de los diferentes servicios de fabricación, se conoce qué tipo de fabricación puede realizar la misma, así como su capacidad. Esto permite distribuir la demanda de los clientes en los distintos servicios de forma más eficiente, conociendo en donde se puede realizar y qué capacidad tiene el sitio que lo produce.

2.2.1. Procedimiento de Scheduling en Cloud Manufacturing

Se entiende por *Scheduling* a la rama de la investigación de operaciones que se interesa por estudiar la asignación de recursos limitados a un conjunto de trabajos por realizar en un horizonte de tiempo, con el fin de optimizar uno o más objetivos [14].

Por su parte, en Liu et al. [11] se plantea una serie de fases generales necesarias a la hora de buscar implementar *Cloud Manufacturing*. Entre estas, se pueden distinguir las siguientes cinco:

- i. Envío de orden: el proceso comienza con el envío de una orden del cliente.
- ii. Procesamiento preliminar de la orden: luego de la recepción de la orden, se debe realizar un análisis preliminar, que incluye la descripción y descomposición de esta.
- iii. Procesamiento de las tareas: se realiza una programación de las tareas necesarias para cumplir con la orden, con ayuda de los módulos de soporte, de gestión de servicio y de gestión de monitoreo.
- iv. Entrega del producto: luego de completada la tarea, los recursos asociados a esta son liberados y el producto resultante es entregado a los consumidores.
- v. Evaluación del servicio: luego de que el cliente recibe el resultado de la ejecución de la tarea, tienen la oportunidad de evaluar el servicio que utilizaron

2.2.2. Procesos para una Scheduling de tareas eficaz y eficiente

De acuerdo con lo que menciona [11], el *Scheduling* en *Cloud Manufacturing* se puede entender de manera limitada o general. Al tomar una visión general, en un proceso

complejo que considera muchas actividades independientes, se obtienen planes de fabricación más efectivos y factibles. En cambio, si nos enfocamos solo en *Scheduling* como proceso independiente del resto y descuidamos otros procesos y actividades, el objetivo real de *Scheduling* en *Cloud Manufacturing* no puede ser alcanzado.

Por ejemplo, un *Scheduling* sin descomposición de tareas no puede garantizar la generación de una planificación práctica ya que el proceso de descomposición es fundamental para la generación de una planificación eficiente.

Teniendo en cuenta la importancia de tener una visión amplia dentro de la temática, los autores distinguen cuatro procesos fundamentales:

- i. Descomposición de tareas: En el inicio del proceso el cliente ingresa una orden al sistema, siendo ésta la tarea principal a realizar. Estas tareas pueden ser simples o complejas, dependiendo de si se trata de una tarea que requiere un único servicio o múltiples servicios para su ejecución. Además, el ingreso de tareas puede ser único o múltiple, pero en *Cloud Manufacturing* es más realista que las tareas sean múltiples, ya que hay muchos clientes solicitando órdenes y estos pueden colocar más de una.
- ii. Emparejamiento, descubrimiento y selección de recursos y servicios: Una vez que se dividen las tareas, se procede a determinar qué proveedores de servicios son adecuados para realizarlas. En sentido más estricto, se evalúa los diferentes requisitos funcionales y no funcionales del sistema para así decidir si un determinado proveedor de servicio lo puede cumplir.
- iii. Configuración, asignación y composición: Este proceso consiste en la asignación de recursos de manufactura para planificar las diferentes tareas, buscando el rendimiento óptimo del sistema.
- iv. Programación de tareas: Lo mismo consiste en la programación de las tareas considerando los recursos disponibles de fabricación.

2.3. Aplicación de métodos de resolución en *Cloud Manufacturing*.

Analizando la evolución del estudio de *Scheduling* en problemas de *Cloud Manufacturing*, es necesario describir qué métodos y enfoques se están utilizando para abordar el estudio de estos problemas. Clasificando los trabajos en función del enfoque y/o método de resolución utilizado por los autores para abordar el problema, nos encontramos con:

- Métodos exactos
- Teoría de Juegos
- Metaheurísticas
- *Machine Learning* o Inteligencia Artificial

En esta sección, haremos énfasis en los Métodos Exactos, enfoque que utilizamos para la resolución de los modelos planteados en el presente trabajo.

El primer trabajo que encontramos dentro de este grupo es Delaram et al. [15]. En el mismo, los autores parten de la analogía que existe con el horario de tareas en *Cloud Computing*, pero incorporando la condición de logística propia de *Cloud Manufacturing*. En el trabajo se propone un modelo lineal de enteros mixtos (MIP), donde se busca minimizar los costos de logística y producción. Resuelven algunos casos ilustrativos utilizando LINGO.

Por su parte, Suma y Murugesan [16] también abordan un problema a través del modelado MIP, pero en este caso el problema optimiza, además de los costos de logística y producción, los tiempos de producción y los de transferencia. Para resolver el problema, utilizan un enfoque Min-Max.

En Vahedi-Nouri et al. [17], otro problema multiobjetivo se aborda utilizando un método de ϵ -constrain. La particularidad del problema aquí estudiado es que permite el rechazo o aceptación de los puestos de trabajo por parte de los proveedores de servicios. Además, los precios y cantidades producidas se establecen con el fin de igualar las ganancias entre todos los productores asociados a la plataforma Cloud Manufacturing.

En Akbaripour et al. [18] se aborda un problema que considera ventanas de tiempo en la disponibilidad de recursos productivos. Para solucionar el problema del transporte y producción de los pedidos de los clientes, los autores proponen un modelo MIP. Este modelo busca minimizar los costos y tiempos de producción y transporte, al mismo tiempo que busca maximizar la calidad del servicio utilizado para la producción. Resuelven el problema utilizando CPLEX.

Otro enfoque es considerar diferentes niveles de decisión donde la decisión de un agente está vinculada a la decisión de otro. Wang et al. [19] es un ejemplo de este enfoque. En su trabajo proponen una estructura multi agente, donde los prestadores de servicios (agentes a corto plazo) optimizan su desempeño ligado a un agente jerárquico con prioridad con objetivos a largo plazo. Sin embargo, el agente jerárquico puede optimizar su medida de desempeño siempre que la función objetivo del resto de agentes de corto plazo ceda dentro de ciertos límites.

A lo largo de los trabajos previamente mencionados, los autores analizan diferentes problemas y configuraciones del problema de *Cloud Manufacturing*, así como también analizan diferentes funciones objetivo (tiempo total de finalización y número ponderado de trabajos tardíos).

Trabajos como [18] fueron tomados como referencia a lo largo de la formulación de los modelos matemáticos que presentaremos más adelante.

En el Anexo I se pueden encontrar otros trabajos en los cuales se utilizan los restantes métodos de resolución.

2.4. Industria láctea en Uruguay

La explotación agropecuaria en Uruguay constituye una parte muy importante en la economía. Aproximadamente el 12% del PBI proviene de este sector, sin contar con las incidencias indirectas como son los transportes y construcciones que genera. Uno de los sectores que componen lo agropecuario, es el sector lácteo y tal como se puede ver en la Figura 2, significa cerca del 15% de dicha exportación [20].

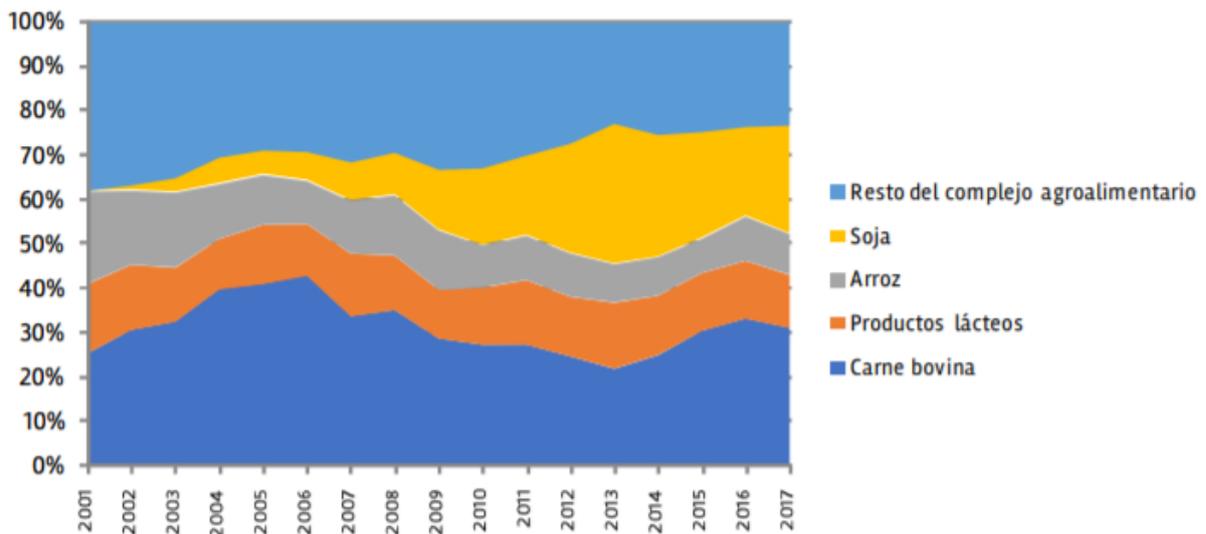


Figura 2. Participación de los diferentes rubros en las exportaciones del sector agroalimentario entre 2001-2017 [20].

A su vez, Uruguay se destaca como productor de productos lácteos, donde más de 20.000 personas se dedican al trabajo en dicha industria haciendo de Uruguay uno de los principales exportadores de América. Cabe destacar que más del 5% del territorio uruguayo se destina a esta industria [21].

Según las últimas cifras del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, existen alrededor de 45.000 establecimientos en la agroindustria. En concreto, la industria lechera genera casi el 9% de las exportaciones uruguayas de bienes y 70% de su producción está dirigida a mercados internacionales, principalmente Venezuela, Brasil, China y Argentina [22].

En Uruguay, la principal empresa láctea recibe aproximadamente el 70% de la remisión de leche del país, mientras que los cinco principales competidores captan únicamente el 21% de la remisión. Esto deja en evidencia que la producción de leche se encuentra concentrada en la empresa principal [4].

En cuanto a las mejoras tecnológicas en el proceso lácteo, se espera una mayor automatización e intensificación de la producción, lo que conlleva un descenso en la mano de obra, pero mayor especialización de esta. Para estas mejoras es necesario un alto grado de inversión, lo que puede significar un beneficio para los tambos de mayor tamaño frente a los familiares, ya que se encuentran con mayor respaldo para realizar la inversión [23].

Con respecto al proceso industrial, Uruguay se encuentra atrasado en la incorporación de tecnología, en comparación con sus principales competidores a nivel global. Esto se debe al alto costo de infraestructura y puesta en funcionamiento que hay en Uruguay [22].

Por su parte, un análisis comparativo de la industria láctea uruguayana con respecto a la industria y manufactura de alimentos en general demuestra que la asignación de recursos ha mejorado con el tiempo y las empresas lácteas más productivas van adquiriendo una importante participación de mercado, tanto en valor agregado como en

producción en general. Esto ha llevado a un aumento de la productividad general de la industria láctea.

El proceso en la producción de leche contiene ciertas características que lo hacen particularmente interesante para realizar un estudio. Cabe considerar que es un producto perecedero y fácilmente contaminable, por lo que es necesario realizar una buena planificación en la producción. A su vez, y con la proyección de un aumento en la demanda, se debe aumentar la productividad y ser más eficientes en la producción. Para esto es necesario la inclusión de nuevas tecnologías que acompañan el proceso de transformación en la industria láctea.

2.5. Contexto Mundial

En general, siete tendencias y dinámicas de la industria están moldeando la estructura y evolución futura de la industria láctea a nivel mundial [22]:

1. Han surgido nuevos grupos de consumidores con una demanda preferencial por productos de nutrición básicos, productos lácteos con propiedades saludables y nutracéuticas o para consumo en momentos de ocio.
2. Los crecientes ingresos en los mercados emergentes están desplazando la demanda hacia alimentos ya preparados, en variedades de base láctea.
3. Los productos lácteos perecederos, con vida útil limitada y una compleja cadena logística, cada vez obtienen precios más premium con la justificación de ser más saludables en comparación con los productos procesados, enlatados o congelados.
4. Los sustitutos de la leche como las bebidas en base a soja, arroz y almendras se están volviendo cada vez más populares.
5. La industria láctea está pasando por una consolidación estructural, con las 10 empresas más importantes del mundo representando el 24% del mercado en 2014, en contraste con el 17% alcanzado en 2009.
6. La globalización de la industria láctea, industria que tradicionalmente se ha desempeñado más que nada en el mercado interno, está aumentando la exposición a los impactos en los mercados internacionales de productos básicos y a la presión descendiente de los precios.
7. Las preocupaciones por temas ambientales y de sostenibilidad dirigen cada vez más la demanda mundial y contribuyen al rediseño del contexto regulatorio de la industria.

Por su parte, el sector agroalimentario se encuentra sujeta a un contexto mundial muy cambiante, con variaciones en el consumo de alimentos. Es difícil analizar la situación de Uruguay sin tomar en cuenta cambios demográficos, tecnológicos y ambientales a nivel mundial que afectan directamente a este sector [20].

A nivel demográfico existen procesos de urbanización y aumento poblacional que impactan directamente en la industria de los alimentos. Se prevé que para el 2050 la demanda de alimentos aumente considerablemente, donde habría un incremento en el consumo de proteínas (que incluye a los lácteos) y una disminución en el de los carbohidratos (por ejemplo, cereales). En la Figura 3 se muestra cómo se espera que sea la variación en la población y la superficie agrícola disponible, en el período de 1970 - 2050. En la misma se puede observar claramente una relación inversamente

proporcional entre la disponibilidad de la superficie agrícola frente al crecimiento poblacional.

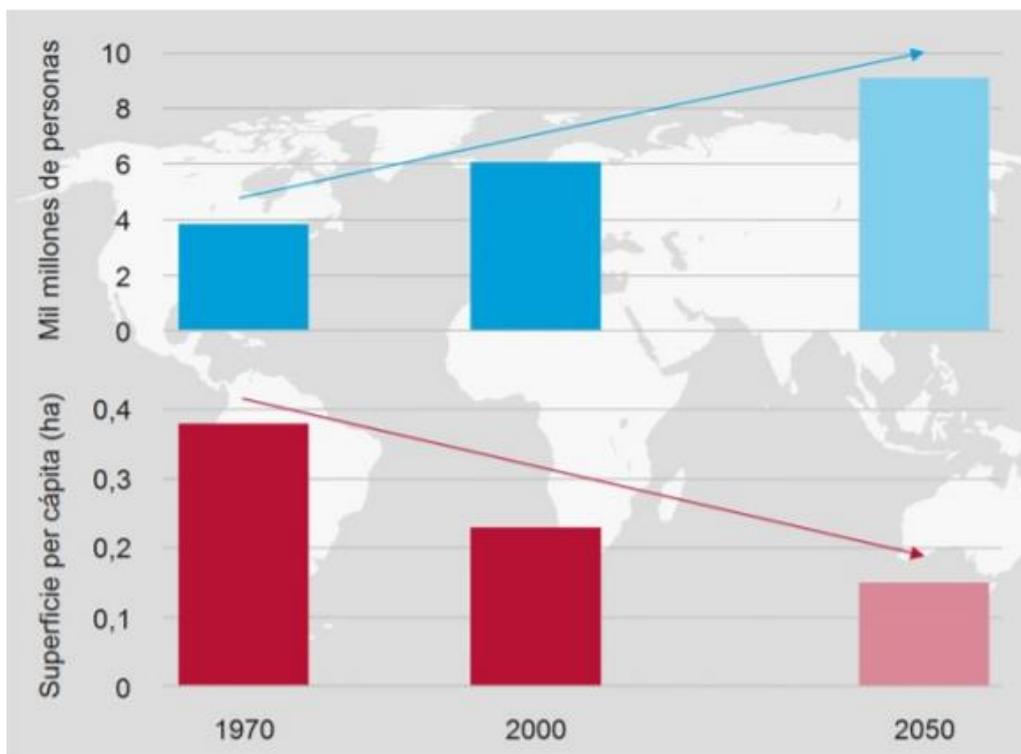


Figura 3. Variación de la población y superficie per cápita [20].

Con una proyección de, por un lado, aumento de la población y, por el otro, reducción en la tierra productiva, existen fuertes tendencias a la aplicación de nuevas tecnologías en el sector agroalimentario. La industria manufacturera se encuentra en una transición por las oportunidades que genera la digitalización, hacia un modelo de industrias 4.0. En la búsqueda de garantizar la suficiencia de alimentos, la industria alimenticia también se encuentra en una transformación hacia una producción inteligente, caracterizada por la orientación hacia el consumidor e incorporación de tecnologías. Además de aumentar la productividad, se busca adaptarse a las preferencias de los consumidores, que cada vez son más informados y exigentes, con una tendencia a los alimentos que influyen positivamente en la salud de una persona.

La incorporación de estas tecnologías tiene influencias en diferentes aspectos. En primer lugar, en cuanto a los modos de producción en el campo, así como aplicación de tecnología para distintos controles. A su vez, se busca realizar mejoras en la gestión de la fabricación, teniendo la opción de realizar la misma de forma remota. Por último, presenta mejoras en la comercialización, con digitalización de la logística y dónde se va hacia un comercio electrónico y tiendas en internet sin necesidad de que existan intermediarios. Las mejoras tecnológicas mencionadas previamente, generan información de calidad y en tiempo real, que permite conocer la situación actual de los procesos y reaccionar rápido ante los problemas. Esto permite obtener procesos más eficientes que brinden mejores resultados en la producción.

Una característica del sector lácteo es la alta volatilidad en el precio y se ve muy afectado por una variación en la oferta o demanda. Actualmente existen acuerdos para

mantener controlado los precios, pero debido al posible aumento de consumo en los próximos años puede haber un impacto en los mismos.

3. Empresa Láctea Utarg

En esta sección se presenta la realidad actual de la empresa con la que se trabajó a lo largo del proyecto de grado. Esta empresa existe en la realidad, pero se utiliza un nombre ficticio (Utarg) por temas de confidencialidad. Se brinda una breve descripción de esta y se mencionan aspectos relacionados a su operativa diaria, incluyendo los procesos productivos necesarios para la elaboración de los distintos productos. Por último, se menciona la comercialización que hoy en día tienen los productos, así como las alianzas comerciales que actualmente mantiene la empresa con otros pares.

3.1. Descripción de la Empresa

La empresa Utarg se especializa en la elaboración de productos lácteos. La empresa fue creada en 2008 y en la actualidad emplea a un total de 32 trabajadores. La empresa, que aún pertenece al dueño fundador, comenzó siendo únicamente de distribución de productos. A medida que fue creciendo, comenzaron a construir una planta para procesamiento de algunos productos básicos. De esta forma además de distribuir productos para otras marcas, podrían realizar algunos procesos de producción para realizar algunos productos propios.

La empresa continuó creciendo y actualmente se encuentra dividida en dos grandes departamentos: elaboración y distribución. La elaboración es realizada en la planta de producción propia de la empresa, ubicada en el departamento de Canelones. Cabe destacar que la empresa desarrolló su propia marca y destina un porcentaje de la producción para realizar productos de otras empresas, pero ya no realiza la distribución de otras marcas. Por su parte, la Distribuidora, ubicada en Montevideo, se encarga del abastecimiento de los productos a clientes minoristas de la capital del país. Los trabajadores se dividen de forma tal que 25 se encuentran en la planta y siete se encargan de gestionar la distribución de los productos.

La empresa procesa entre 25 y 30 mil litros de leche por día para realizar distintos productos, dentro de los cuales se encuentran:

- Leche Entera
- Leche Descremada
- Leche Larga Vida (Entera y Descremada)
- Crema de Leche
- Manteca
- Yogurt
- Bebidas Lácteas

Además de la leche recibida de los distintos tambos, la empresa precisa de diferentes insumos para realizar los productos. Entre estos se destacan:

- Films de envasado
- Saborizantes
- Azúcar

Debido a las características de este producto perecedero, se requiere de una toma de decisiones contantes en lo relacionado a la producción y gran parte de estas se resuelven a partir de experiencias previas, sin un estudio de alternativas.

3.2. Operativa diaria

Un aspecto importante a tener en cuenta es que, al momento de la recolección de la leche de los tambos, se debe retirar toda la leche que estos producen, por lo que no se conoce con exactitud la cantidad de leche disponible para realizar la producción hasta luego de la recolección.

Debido a esto, la planificación de la producción diaria se realiza luego de la recolección, cuando se tiene real dimensionamiento de la materia prima disponible, ocasionando diferentes inconvenientes a la hora de planificar. En primer lugar, no se sabe si la leche que se va a recibir es suficiente para cumplir con la demanda de los clientes. A su vez, en caso de que se reciba más leche de lo que se puede procesar por la fábrica, se tendrá que producir más de algún producto o vender el excedente para no desecharla.

Para enfrentar estos problemas, la empresa actualmente tiene datos históricos a partir de los cuales pueden tener información aproximada de las variaciones en la producción de los tambos.

La empresa tiene dos proveedores de leche, que cuentan con un total de ocho tambos. La recolección se realiza en un camión cisterna que dispone de tres compartimientos individuales para el transporte de la leche desde los tambos a la planta de elaboración.

Previo a que se cargue la leche, se realizan una serie de estudios que brindan resultados instantáneos sobre la calidad de la leche, en donde se determinan características como la temperatura y acidez. En función de los estudios realizados, el transportista asigna un compartimiento particular del camión para transportar la leche recolectada en cada tambo.

Por su parte, y también al momento de la recolección, el transportista realiza un estudio para determinar la presencia de antibióticos. En este caso, los resultados no son inmediatos, sino que suelen demorar alrededor de tres horas. Teniendo en consideración las restricciones ya mencionadas, la demora en la obtención de los resultados del estudio realizado genera que los mismos se conozcan recién al momento de arribar a la fábrica. En caso de existir la presencia de determinados antibióticos particulares, la leche no puede destinarse a la elaboración de productos.

Debido a las características de la leche, toda lo recolectado debe ser procesado, en un plazo no mayor a dos días, para la elaboración de cualquiera de los productos mencionados anteriormente. La principal razón por la cual se procede de esta manera es que la leche tiene corto período de vencimiento una vez obtenida.

A partir de la cantidad de leche recogida en el día, de la demanda y de la capacidad de almacenamiento de los distintos productos, se planifica cuales se fabricarán. En cualquier caso, se debe producir la cantidad demandada por los clientes y con lo restante se decide que productos realizar teniendo en cuenta factores como costos o capacidad de almacenamiento.

3.3. Procesos Productivos

Para la fabricación de los distintos productos se distingue una serie de procesos de producción. Los principales procesos son el descremado y la pasteurización que, aun estando presente en los procesos de elaboración de todos los productos, presentan una variabilidad o configuración característica del producto elaborado.

Por las características propias de la materia prima, no suele dejarse producto en proceso al final del día (se echa a perder), por lo que, toda la leche que inicia el proceso productivo debe terminar de procesarse dentro de la misma jornada de trabajo. La jornada comienza con la decisión inicial de qué producir a partir de la leche recolectada el día anterior.

La jornada de recolección de la leche se realiza en la mañana y al llegar a la empresa queda almacenada en silos para su posterior utilización. Cuando la leche ya se encuentra en la empresa, es cuando se tiene el resultado del examen de antibióticos que demora unas tres horas.

Independientemente del producto que se vaya a realizar, la leche ingresa a la fábrica a través de caños de acero y es siempre calentada a través de un intercambiador de calor para su acondicionamiento para el proceso de descremado.

3.3.1. Leche Entera o Leche Descremada

Calentada la leche, la misma llega a la descremadora que, en función del producto a realizar, se descrema hasta un porcentaje de grasa determinado. La leche proveniente de los tambos contiene aproximadamente un 4% de grasa, mientras que la leche entera, contiene alrededor de un 2% y la leche descremada no contiene grasa, por lo que según el producto a realizar es que se ajusta la máquina.

Como salidas del proceso de descremado, se obtienen dos subproductos. Por un lado, el producto derivado de la leche con un porcentaje de grasa inferior al original y por el otro, el subproducto con alto contenido de grasa denominado crema de leche.

Luego del descremado, la leche reducida en grasa pasa por un homogeneizador de glóbulos grasos cuyo objetivo principal es integrar los mismos a la leche, impidiendo así que estos se separen una vez envasada la leche. El funcionamiento del homogeneizador consta del pasaje de la leche a alta velocidad por un tubo de diámetro pequeño, de manera tal que la presión generada desintegre los glóbulos grasos.

Una vez homogeneizada, la leche pasa por la pasteurizadora. La configuración de la misma depende de si se desea ultra pasteurizada o pasteurizar la leche. La diferencia de la ultra pasteurización con la pasteurización se da en la temperatura alcanzada y el tiempo de exposición a esa temperatura. El beneficio de la ultra pasteurización es que permite que se conserve mejor la leche, siempre y cuando el envase se encuentre en buenas condiciones y se almacene a temperatura ambiente.

Luego de calentada la leche, la misma es enfriada rápidamente. Para esto, la leche pasa por el intercambiador de calor, brindando el calor necesario para calentar la leche que ingresa de los silos. Debido a las altas temperaturas alcanzadas al momento de la pasteurización, también se utiliza agua fría para disminuir la temperatura de la leche.

Enfriada la leche, la misma llega por tubos de acero a la zona de envasado en la cual se distinguen dos grandes máquinas, una para leche larga vida y otra para leche fresca.

El proceso de envasado de la leche larga vida es un proceso más cuidadoso con respecto a la posibilidad de contaminación. Para esto se utiliza una máquina cerrada herméticamente y con controles estrictos de temperatura y limpieza. La misma, cuenta con limpiezas programadas de acuerdo con especificaciones de fábrica.

Por su parte, para envasar la leche fresca no se requieren de los mismos cuidados que la leche larga vida, no se precisa una máquina cerrada herméticamente ni se tiene los controles estrictos de la máquina como para la leche larga vida.

Sobre ambos tipos de leche se realizan una serie de tests microbiológicos para asegurarse que los mismos cumplen con las condiciones impuestas por los organismos reguladores.

3.3.2.Crema Doble

A partir del proceso de descremado de la leche, se obtiene el subproducto crema de leche utilizado para la fabricación de la crema doble.

Dicha crema de leche es pasteurizada en la misma máquina que la leche, aunque en este caso el pasteurizado se realiza de acuerdo con ciertas especificaciones particulares. Una vez pasteurizada, se realizan una serie de tests microbiológicos para luego ser envasada a la espera de los resultados. Obtenidos los resultados positivos, la crema doble queda lista para ser transportada hacia los distintos clientes.

3.3.3.Manteca

La manteca también se obtiene a partir de la crema de leche obtenida en el descremado de la leche cruda.

La misma crema de leche, en su pasaje a la zona de mantequería, es pasteurizada a una temperatura y tiempo específico. Luego la crema de leche pasa a la mezcladora en la que, mediante un proceso de centrifugado, se separa el suero de la leche del producto final denominado manteca.

Finalizado el proceso de mezcla, se realizan una serie de tests microbiológicos sobre la manteca como forma de asegurarse que la misma cumple con las restricciones impuestas por los distintos organismos estatales. Hay que considerar que, por la manualidad que existe en la fabricación de manteca, este producto posiblemente es el que mayor probabilidad de contaminación tiene.

Como última etapa del proceso de elaboración de manteca, se tienen los subprocesos de bloqueo y empaquetado, los cuales difieren en función de los tamaños seleccionados para producir (100g, 200g, 5kg).

Una vez bloqueada y previo al empaquetado, se realizan otra serie de tests microbiológicos. El producto terminado no es expedido hasta contar con los resultados positivos de los mencionados tests. En caso de contar con resultados negativos o no acordes a la reglamentación, la manteca es desechada.

3.3.4. Yogurt

En el caso del yogurt, una vez que la leche pasa por la etapa de descremado, la misma es almacenada en silos definidos exclusivos para la fabricación de yogurt. Es en dichos silos que comienza la etapa de agregados.

Una vez obtenida la leche con su correspondiente porcentaje graso particular para la fabricación de yogurt, se comienzan a incorporar ciertos agregados fundamentales para la posterior obtención del producto final dentro de los cuales se incluyen azúcar, almidón, gelatina, entre otros.

Ya habiendo incorporado esa primera etapa de agregados, ese producto intermedio pasa por la pasteurizadora (configurada adecuadamente para la pasteurización del yogurt) y es transportada a silos ubicados en el sector de fabricación de yogurt.

En dichos silos, el producto intermedio es subdividido de acuerdo con los sabores de yogurt a fabricar. En cualquier caso, es en dichos silos que se agregan los fermentos utilizados para la fabricación. En los casos particulares del yogurt de frutilla y de durazno, también se agrega la fruta y los correspondientes colorantes.

Habiendo reposado por un lapso ya estipulado, el yogurt es empaquetado en su correspondiente empaque. Para esto se utiliza una máquina similar a la utilizada para el caso de la leche fresca. En el caso del yogurt, los distintos agregados permiten incrementar el período de vencimiento por lo cual no es necesario un proceso de empaquetado cerrado como si es necesario para el caso de la leche larga vida.

3.4. Comercialización

Los productos fabricados por la empresa son comercializados en el interior del país y en la capital. Para el interior del país, se cuenta con dos principales clientes ubicados en Paysandú y Salto. El abastecimiento a los mismos depende de la demanda particular de cada uno, pero en promedio, se abastecen tres y una vez por semana respectivamente.

A su vez, la empresa cuenta con un sector dedicado a la distribución y comercialización de sus productos en la capital del país que distribuye los productos a distintos clientes minoristas ubicados en Montevideo. Dicho sector cuenta con un depósito ubicado en la periferia de la capital el cual es abastecido de manera diaria, de acuerdo con los distintos pedidos de los clientes minoristas. Vale aclarar que, para esta distribución, se dispone de una flota de camionetas especialmente equipadas para el abastecimiento de estos clientes.

3.5. Alianzas comerciales

Además de la producción para su propia marca, Utarg posee acuerdos comerciales con otras empresas asociadas para la producción de determinados productos. Dentro de las empresas con las cuales se establecen relaciones comerciales se encuentran Rador, Ala y Kimke (así como sucede con Utarg, se trata de empresas reales a las que se les asignó un nombre ficticio por temas de confidencialidad).

De acuerdo con lo comentado por el personal de la empresa, estas alianzas han sido exitosas y no se descarta generar nuevas con otras empresas. Sin embargo, en algunos

casos se trata de acuerdos informales donde no existen obligaciones y se realizan intercambios de productos dependiendo de las producciones de cada día. Estos acuerdos son útiles debido a que la capacidad de producción utilizada exclusivamente para la demanda de los clientes finales de la empresa es inferior a la capacidad total de la fábrica. Por su parte, Utarg obtiene por estos acuerdos productos que no tiene la capacidad de fabricar.

3.5.1.Rador

El acuerdo comercial con esta productora consta de un intercambio de productos. Es decir, Utarg le “vende” leche a la productora y la misma le “vende” quesos a la empresa (estas transacciones se realizan a un precio especial acordado por ambas empresas).

Este acuerdo le permite a Utarg poder comercializar productos que actualmente no tiene la capacidad de producir. De esta forma la empresa mejora su posición en el mercado, pudiendo ampliar la cartera de productos para ofrecer a los clientes. La empresa es consciente de la necesidad de expandir los productos comercializados, por lo que esta alianza es de vital importancia para la misma.

3.5.2.Kimke

En esta relación comercial, Kimke terceriza la producción de leche para luego venderla bajo su marca propia. La compra, recolección de leche por los tambos y el traslado hasta la fábrica, corre por cuenta de Kimke.

A partir de la leche recolectada, se produce leche entera y descremada ultra pasteurizada. Esta leche se produce siguiendo el mismo proceso productivo descrito anteriormente, con la salvedad que se tiene un envase particular que diferencia a la marca comercializada.

Cabe mencionar que este acuerdo es formal y ambas partes tienen obligaciones y asumieron compromisos. Kimke entrega cierta cantidad de leche para producir y Utarg cumple con el procesamiento de esta.

3.5.3.Ala

En el caso de esta empresa, Utarg recibe crema de leche para la producción de manteca. Al recibir la crema de leche, y previo a la elaboración de la manteca, la misma pasa por el proceso de pasteurización y luego pasa a la zona de mantequería. En dicha zona, el proceso productivo respeta los lineamientos ya detallados, con la particularidad que se produce en bloques de 5kg y se envasa en papel de film.

4. Aplicación de Cloud Manufacturing en la Industria Láctea Uruguay

A lo largo de esta sección, haremos especial énfasis en la realidad actual de la Industria Láctea Uruguay y analizaremos el camino a transitar para la aplicación efectiva de *Cloud Manufacturing* en la misma. Para esto último, detallaremos algunos aspectos que entendemos servirán de motivación a la hora de elegir transitar el cambio y destacaremos las características principales de *Cloud Manufacturing* a partir de las cuales proponemos el mismo.

4.1. Situación Actual

Según los datos del FFDSAL (Fondo de Financiamiento y Desarrollo Sustentable de la Actividad Lechera), las tres principales industrias captan el 83% de la leche procesada a nivel industrial. Un dato interesante para observar es que, si se agrupan las 8 principales industrias en Uruguay, la captación de estas alcanza un 94% [21].

A continuación, se analiza en detalle cómo se distribuye la captación de leche en las diferentes industrias del país. Como se puede observar en la Figura 4, la principal industria es Conaprole que alcanza un 70% de la captación de leche, quien la sigue es Estancias del Lago con el 7%. Aquí ya se puede observar la gran diferencia que existe entre la principal industria y la siguiente, la cual tiene una captación de leche 10 veces menor. En tercer lugar, se encuentra Alimentos Fray Bentos con un 6%, luego Indulacsa y Claldy con un 3%, los sigue Calcar y Granja Pocha con un 2% cada una y en el octavo puesto se encontró Farming que captó 1% de la leche remitida en ese año.

Así como se puede observar una gran diferencia entre la principal industria y la segunda, se puede apreciar que existe muy poca variación entre la segunda hasta la octava industria con mayor captación. Esto evidencia que existe una gran centralización de la producción de leche, donde la mayoría de las empresas tienen el menor porcentaje de participación en el mercado.

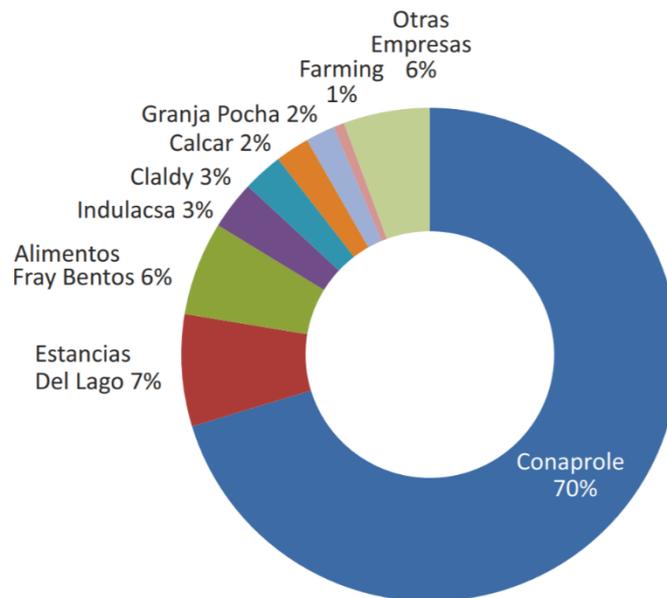


Figura 4. Distribución de la captación de leche por industria láctea [21]

Por otro lado, el sector lácteo del país es altamente exportador, donde casi el 70% de la leche producida es exportada. Aunque el consumo en el país es estable, el mercado interno es pequeño, por lo que cualquier incremento en la producción, en general, implica una mayor exportación.

Como se mencionó en la Sección 2.3, el mercado lácteo es muy volátil y cualquier variación en la oferta o demanda puede tener un impacto en el mismo. Un claro ejemplo de esto es lo que sucedió en los últimos años con la leche en polvo y su aumento de consumo. Uno de los factores de este incremento fue que la demanda interna de China aumentó y la producción local no era suficiente para satisfacerla, por lo que se tuvo que importar. Al existir mayor demanda, el precio de leche en polvo aumentó y tuvo un impacto directo en las industrias de nuestro país, quienes aprovecharon la oportunidad para producir este producto [24].

En cuanto a la tecnología en el sector, la aplicación de tecnologías 4.0 en industrias lácteas a nivel mundial aún es relativamente baja. En la misma se destaca la digitalización de actividades productivas y comerciales con el objetivo de disminuir costos y tiempos de producción y traslado. Esto permite a las empresas tener una trazabilidad de sus productos y fomenta la implementación de entregas *just-in-time*, lo que actualmente no es sencillo de aplicar por las características del proceso productivo [23].

La falta de tecnología se evidencia principalmente en las pequeñas y medianas empresas (pymes) del sector. Esto se ve reflejado en falencias en la comunicación a lo largo de la cadena de suministros, desde los tambos hasta los clientes. La falta de información actualizada es otra de las debilidades que presentan las fábricas, las cuales no saben la cantidad de leche que recibirán de los tambos hasta que el camión cisterna pasa a recogerla, ni su calidad. Esto lleva a que se realice la planificación de la producción con información y tiempos acotados, lo que puede resultar en una planificación ineficiente.

Aún en la escasez de tecnologías en la industria láctea uruguaya, y así como es mencionado en la Sección 3.5, algunas de las empresas del mercado mantienen alianzas para la elaboración de productos cruzados.

4.2. Motivación

Tal como se menciona en la Sección 4.1, el 70% de la captación de leche corresponde únicamente a la principal empresa del país. Lo restante es captado por una gran cantidad de pequeñas y medianas empresas de la industria láctea, las cuales por sí solas no son capaces de competir contra las grandes corporaciones.

En comparación con las grandes empresas, estas fábricas se encuentran en desventaja en cuanto a economías de escala, inversiones en tecnología e innovación, incluso en la posibilidad de penetrar nuevos mercados, como es la exportación de productos lácteos. En un mundo globalizado con permanentes innovaciones en tecnología, para poder subsistir en el mercado, las pymes deben adaptarse a estos cambios que apuntan hacia industrias digitalizadas y altamente eficientes. Esto representa una gran inversión de capital, lo que dificulta el acceso de las pymes.

Como menciona Alderete [25], es reconocido que las redes o alianzas de pymes tienen un gran valor para el éxito empresarial. La cooperación es una estrategia para superar algunas de las debilidades ya mencionadas como el limitado acceso a los mercados externos, la financiación y los atrasos tecnológicos.

Considerando el gran porcentaje de captación de leche que recibe la principal empresa y las desventajas que presentan las pymes respecto a esta, la alianza entre las pymes parece ser una estrategia atractiva para superar sus debilidades.

La falta de plataformas poderosas que permitan la interacción entre clientes y fábricas, así como la colaboración entre fábricas dispersas geográficamente en tiempo real, propone un gran desafío para el proceso de transformación hacia un paradigma de fabricación colaborativo.

A su vez, cabe considerar que gran parte de los productos elaborados por estas fábricas pertenecen al segmento estratégico PNPL (perecederos, no premium, locales). Estos productos lácteos se definen como aquellos por los cuales los consumidores no estarían dispuestos a pagar un precio más elevado como, por ejemplo, la leche fresca pasteurizada de producción masiva (baja diferenciación con precios bajos y volátiles). El manejo de información precisa y confiable en relación con la elaboración del producto es fundamental para el éxito del proceso [22].

Cloud Manufacturing propone una solución atractiva para los problemas mencionados anteriormente, ya que permite la integración de recursos de fabricación de las pymes asociadas. En este paradigma de fabricación, los recursos o máquinas de todas las empresas son encapsulados en servicios de fabricación, los cuales componen el conjunto de servicios disponibles para realizar los productos solicitados por los clientes. La descentralización de los procesos productivos y la colaboración en el uso compartido de los recursos e información, son dos de los pilares fundamentales de este paradigma.

La plataforma propuesta identifica estos servicios de fabricación para satisfacer los requerimientos del cliente y recomienda los servicios a utilizar, con el objetivo de brindar

un producto final más económico como resultado de un proceso más eficiente. Debido a las características de la industria y considerando la distribución geográfica de las fábricas, resulta desafiante la selección óptima de los servicios de fabricación y su planificación.

Más allá de los beneficios obtenidos por la aplicación de este paradigma de fabricación, la capacidad ociosa que se obtendría a partir de una mejor planificación podría ser utilizada para desarrollar y producir nuevos productos o productos personalizados que destaquen y puedan irrumpir en el mercado. De esta forma, se obtendría una ventaja competitiva sobre las grandes empresas.

4.3. Descentralización de la producción

Como es mencionado en la Sección 3.5, hoy en día existen distintos acuerdos para la fabricación de determinados productos para otras empresas. Esta característica propone un punto de partida para la aplicación de *Cloud Manufacturing*, ya que el proceso actual considera cierta descentralización de los procesos productivos.

Sin embargo, teniendo en cuenta el modelo de fabricación de *Cloud Manufacturing*, se considera necesario adaptar la realidad actual de Utarg hacia un entorno en el que se apliquen los conceptos de este nuevo paradigma.

En función de esto, se plantea profundizar en los acuerdos mencionados para que los productos se puedan realizar en diferentes fábricas y no dependan de una única línea de producción. En otras palabras, que la totalidad del producto se pueda realizar en distintas fábricas y no limitarse a las capacidades de producción de la fábrica de origen. Esta "indiferencia" a la hora de asignar los pedidos permitirá a las fábricas enfocarse en realizar aquellos productos que tenga la capacidad de producir.

A partir de todas estas consideraciones, la aplicación de *Cloud Manufacturing* permitiría la obtención de mejores resultados a la hora de la producción y cumplimiento de las órdenes realizadas por los clientes.

4.4. Compartir Recursos

Una de las posibles aplicaciones de *Cloud Manufacturing* es que un conjunto de empresas pueda aliarse compartiendo recursos, para así poder competir con las grandes compañías.

Esta agrupación de recursos brinda la posibilidad de generar cadenas productivas integradas por servicios de fabricación provenientes de más de un proveedor, lo conlleva a que la producción pueda realizarse en diferentes ubicaciones geográficas.

En este caso particular, el conjunto de empresas comparte sus recursos para cumplir con la demanda de los clientes. Esto permite que se pueda colocar órdenes de producción en las fábricas de manera indistinta, considerando los parámetros de producción particulares de esta.

Además de los recursos de fabricación, se deben considerar a los proveedores de materia prima en la colaboración entre las distintas empresas. Es decir, que las fábricas no tengan asignados recursos previamente, sino que puedan recibir leche de cualquier

tambo del conjunto. Esto permite mayor flexibilidad a la hora de planificar la producción entre las fábricas y ser más eficientes en la asignación de los recursos para la producción.

El hecho de compartir recursos permite que las empresas no tengan que fabricar todos los productos que comercializan. Por el contrario, se busca que estas se complementen y puedan especializarse en ciertos procesos, logrando mayor eficiencia. Como es mencionado en la Sección 3.5, Utarg no tiene la posibilidad de producir quesos, por lo que tiene un acuerdo con Rador. De esta forma, este conjunto de empresas abarca un mayor mercado y se fortalece frente a las grandes compañías. Si se potencia este concepto en la empresa, se puede lograr un entorno colaborativo, necesario para la implementación de *Cloud Manufacturing*.

La posibilidad de compartir recursos es un concepto muy importante en *Cloud Manufacturing*, ya que considera al conjunto de fábricas como uno y busca las mejoras para el conjunto, no para cada elemento en particular. Esto quiere decir que interesa las eficiencias globales, entregar el mejor producto al cliente lo más rápido posible, sin tener gran relevancia donde se realiza el mismo.

4.5. Plataforma para la Aplicación de Cloud Manufacturing

Para poder aplicar *Cloud Manufacturing* en un conjunto de pymes de la industria láctea uruguaya, consideramos importante la incorporación de una plataforma web, en la que se agrupen los servicios de fabricación del conjunto de empresas y el conjunto de proveedores de materia prima. El objetivo de esta plataforma será recibir las órdenes de los clientes y en base de esta demanda, buscar y seleccionar los servicios de fabricación para satisfacerla.

La recepción de pedidos en la plataforma planteada debe funcionar de manera similar a lo que sería una implementación de e-commerce en donde, a partir de un catálogo de productos, los distintos clientes ingresan sus pedidos. Luego la plataforma realiza la asignación de los pedidos recibidos a las distintas fábricas, en función de distintos parámetros propios de cada fábrica.

Luego de dicha asignación, se procede a realizar la planificación de las tareas en las distintas fábricas. Evidentemente, esta planificación debe considerar las tareas asignadas en el paso previo.

La plataforma planteada se encontraría comunicada con el conjunto de empresas y los clientes para definir, luego de concluido el período otorgado para la realización de los pedidos, como realizar la asignación de estos y definir la planificación de tareas en las distintas fábricas. A su vez, esta plataforma debe incluir, entre otras cosas, los posibles traslados de crema de leche entre las distintas plantas productivas.

El desarrollo e implementación de una plataforma como la planteada anteriormente, escapan del alcance del presente trabajo, cuyo enfoque está en cómo se realiza la asignación de órdenes y su respectiva planificación en cada una de las fábricas. De todas maneras, nos pareció importante describir cómo se enmarcaría el trabajo de forma global para su aplicación.

5. Sistema de asignación y planificación

A lo largo de esta sección se presenta una descripción completa del problema de fabricación de productos lácteos para satisfacer la demanda de los clientes. El problema se aborda a partir de las cinco grandes fases necesarias para la correcta implementación de *Cloud Manufacturing* (de acuerdo con lo mencionado en la Sección 2.1).

Tal como es mencionado en la Sección 4.5, una aplicación completa de *Cloud Manufacturing* contemplaría la recepción de las órdenes de los distintos clientes, previa validación de los valores ingresados, a través de una plataforma web.

A partir del ingreso de órdenes, se obtiene la totalidad de pedidos a cumplir en un plazo de tiempo determinado y se comienza con el procesamiento de las tareas necesarias para la producción del total de pedidos.

Para una asignación eficiente de los pedidos a las distintas fábricas y su respectiva planificación, la plataforma planteada debe contar con un sistema de asignación y planificación que optimiza los costos y tiempos de producción y minimiza los retrasos en la entrega de los pedidos.

En este estudio se pretende responder las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo modelar la selección y asignación de servicios de fabricación con el objetivo de optimizar los tiempos y costos implicados en la producción?
2. ¿Cómo modelar la planificación de la producción en cada fábrica, para cumplir con las órdenes asignadas?

Para responder estas preguntas, se desarrollaron dos modelos de programación entera mixta (MIP). A través del primero de ellos, se pretende abordar el problema de asignación de órdenes considerando la logística entre los servicios de fabricación, mientras que a través del segundo se intenta resolver la planificación de tareas a nivel de cada fábrica.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se entiende que las fases de envío de orden, procesamiento preliminar de la orden, procesamiento de las tareas y entrega del producto son consideradas dentro de la solución planteada y presentada a continuación.

Por su parte, como destacan [5] y [8], son de gran importancia los vínculos entre los diferentes agentes del proceso productivo, con principal énfasis en la coordinación y gestión de actividades a realizar de manera conjunta. Esta sinergia alcanzada con los modelos planteados a continuación contribuye a una maximización de capacidades y recursos, cumpliendo de esta forma, con los principios de *Cloud Manufacturing* planteados por estos autores.

5.1. Descripción del problema

En la solución planteada, además de integrar y gestionar recursos de fabricación distribuidos geográficamente, permite a los clientes ordenar un abanico de productos lácteos.

En primer lugar, existe un conjunto de tambos y otro de fábricas que integran el sistema, los cuales tienen ciertos compromisos y obligaciones que asumir. Las fábricas deberán producir lo que se les asigne, mientras que la posible asignación que se obtenga del sistema asegura un mínimo de utilización a cada fábrica. Es decir, no puede suceder que una fábrica no tenga ninguna orden asignada. El sistema considera como fecha de entrega límite al último día de la semana, día en el cual las fábricas podrán comprometerse con la entrega del total de las órdenes. De todas formas, se le permite al cliente ingresar una fecha deseada de entrega a partir de la cual se intenta minimizar el retraso.

Por su parte, se realizan ciertas validaciones sobre las órdenes ingresadas. En una aplicación completa, sería la plataforma quién realizaría estos controles de forma automática. En primer lugar, el conjunto de tambos es seleccionado de tal forma que el conjunto de fábricas pueda procesar toda la leche que los tambos producen. Es decir, no puede suceder que la producción de leche de los tambos sea mayor a la capacidad de procesamiento del conjunto de fábricas.

Por otro lado, se contabilizan las órdenes que ingresan los clientes y se impide la recepción de nuevas órdenes cuando se supere el límite de leche disponible (de acuerdo con datos previamente estimados). De esta forma, el sistema asegura que haya materia prima suficiente para producir toda la demanda.

Debido a que las órdenes por producto/cliente son procesadas por una sola fábrica, se limita la cantidad máxima de un producto por orden, de acuerdo a la menor de las capacidades del conjunto de fábricas por producto. Es decir, si se recibe una orden que no pueda ser realizada por la fábrica con menor capacidad, se solicita que la misma sea dividida en determinada cantidad de órdenes, tal que estas sean menores que la cantidad máxima permitida.

Los modelos propuestos a continuación tienen dos objetivos. Por un lado, se encuentra el objetivo de asignar las órdenes de los clientes a las distintas fábricas participantes, optimizando los costos y tiempos, tanto de producción como logísticos. Por el otro lado, contribuir con la planificación de la producción en cada una de las fábricas, minimizando los retrasos con respecto a las fechas deseadas por los clientes.

A través del modelo de asignación se obtienen las órdenes a producir por cada fábrica durante la semana, así como la cantidad de leche recibida de cada tambo. Como se puede apreciar en la Figura 5, esta asignación significa la demanda a cumplir de las fábricas.

Por su parte, el modelo de planificación toma cómo parámetros las órdenes y la cantidad de leche recibida de cada tambo, asignadas por el sistema de asignación. A partir de esta información, se obtiene una planificación de la producción diaria de cada fábrica, para poder cumplir con la demanda de los clientes en el día solicitado, minimizando los retrasos en las entregas.

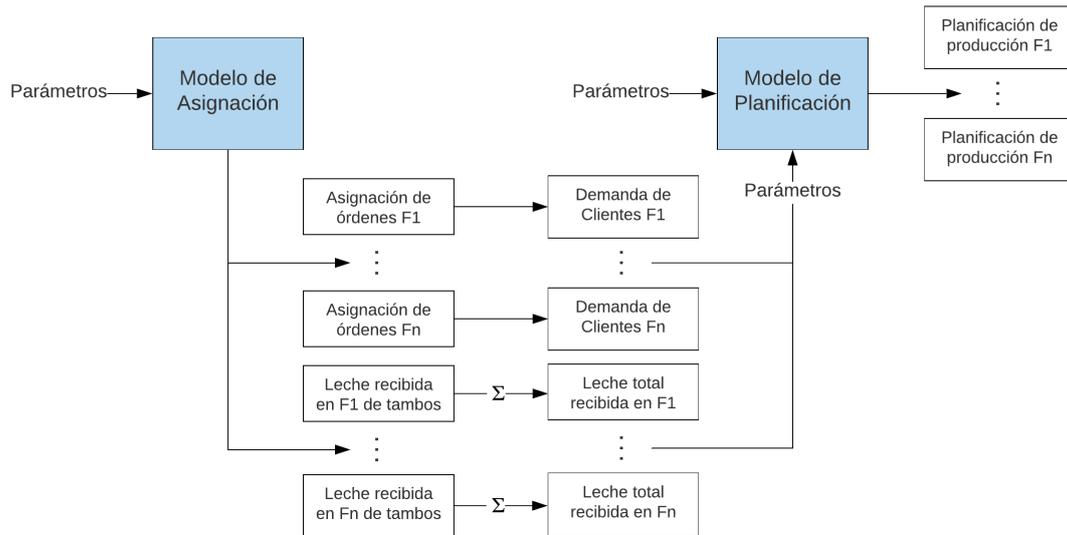


Figura 5. Integración del modelo de asignación y planificación

Como se puede observar en la Figura 5, en el modelo de planificación los parámetros de demanda de los distintos clientes corresponden a las órdenes que se le haya asignado a cada fábrica. Por su parte, los parámetros de la leche recibida en la semana por cada fábrica corresponden a la sumatoria de leche recibida de cada tambo.

A modo de resumen, los dos modelos utilizados para obtener una planificación semanal son:

1. Modelo de asignación: Realizar la asignación semanal de producción para los diferentes productos solicitados por los clientes en las distintas fábricas, minimizando los costos y tiempos asociados.
2. Modelo de Planificación: Planificación semanal de la producción en cada fábrica, de forma tal que se minimicen los retrasos respecto a las fechas de entrega esperadas por los clientes.

5.2. Formulación del Modelo Matemático: Modelo de Asignación

Como fue mencionado en la Sección 5.1, el objetivo de este primer modelo matemático es minimizar los tiempos y costos para la asignación de las órdenes de clientes. Es decir, tomando en cuenta la demanda de los clientes, determinar qué orden producto/cliente debe realizar cada fábrica, minimizando los costos y tiempos involucrados, tanto en la fabricación como en la logística. Este último término refiere al transporte de materia prima entre tambores y fábricas, el de crema de leche entre las

distintas fábricas y por último, el transporte de producto terminado desde las fábricas hasta los distintos clientes.

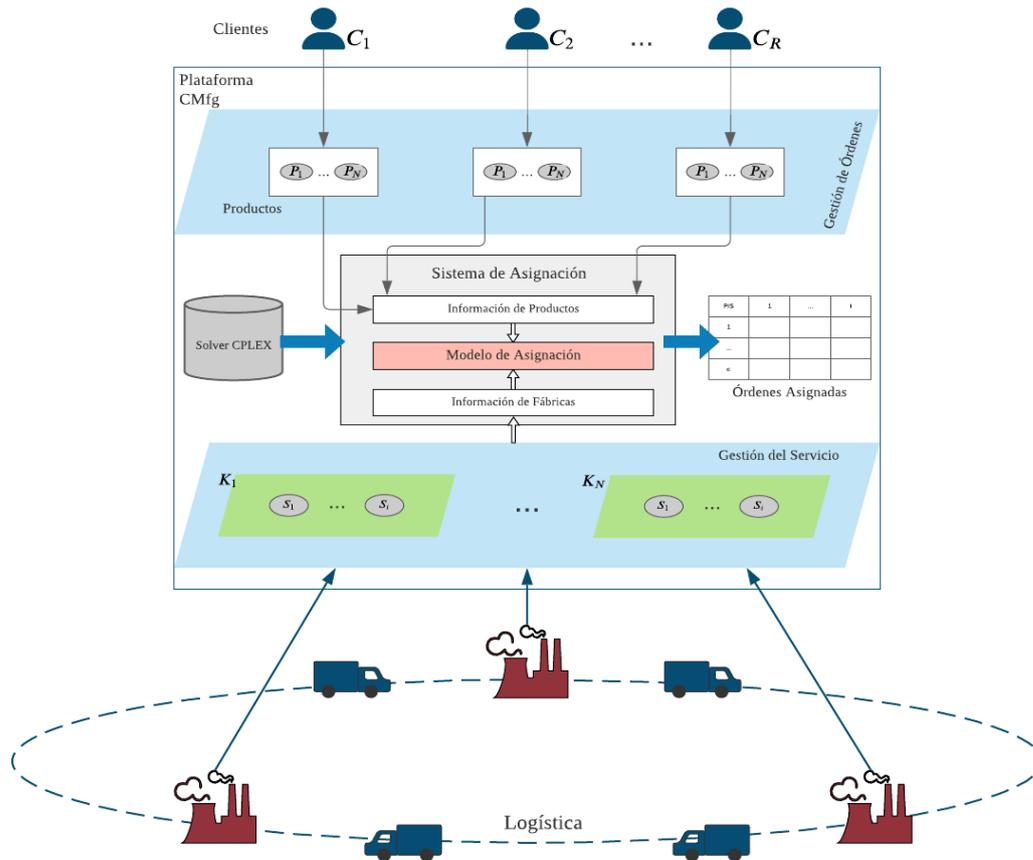


Figura 6. Plataforma de Cloud Manufacturing y sistema de Asignación

La Figura 6 muestra la interacción entre las distintas partes involucradas en la plataforma de Cloud Manufacturing y cómo estas se relacionan con el modelo en cuestión. En la misma, cada agente de la plataforma es identificado con una letra particular de acuerdo con:

- El conjunto C corresponde a los clientes de la plataforma y tiene cardinalidad R .
- P es el conjunto de productos con cardinalidad N .
- El conjunto S representa a las fábricas con subíndice i .
- El conjunto de fábricas capacitadas para producir el producto p , con cardinalidad N' , se denomina K_p .

En primer lugar, se gestionan las órdenes de los clientes que corresponden a una cantidad determinada de cada producto del conjunto P . Por otro lado, se releva la información de las distintas fábricas, por ejemplo, de las máquinas disponibles en el momento con los costos y tiempos de producción correspondientes. Con esta información, en la gestión del servicio mostrada en la Figura 6, se determina el conjunto de fábricas capaces de realizar cada producto (K).

A través del modelo de asignación, se obtiene la asignación óptima de las órdenes de los clientes, a nivel de producto, a cada una de las fábricas. El modelo fue implementado en AMPL y se utilizó el solver CPLEX 12.10.0.0. para obtener la solución óptima.

Para un mejor entendimiento del modelo, en la Figura 7 se presenta un diagrama de estados de la leche y sus derivados a lo largo del proceso de producción.

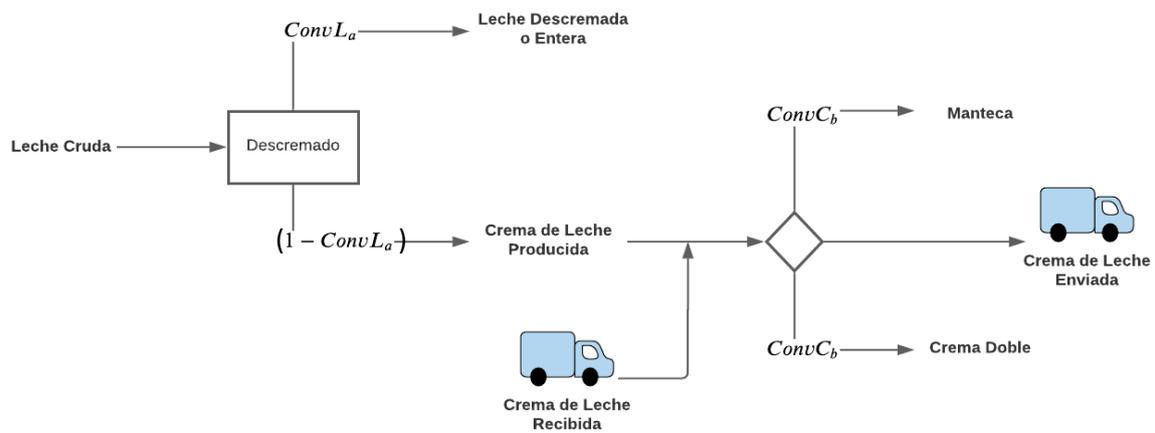


Figura 7. Entradas y Salidas del Proceso de Producción.

El primer proceso que se realiza al llegar a la fábrica es el descremado, cuya función principal es reducir el contenido de grasa de la leche cruda. Al finalizar este proceso, se obtienen dos subproductos, uno con bajo contenido de grasa a partir del cual se obtienen leche entera o descremada. El otro subproducto es de alto contenido de grasa, denominado crema de leche, a partir del cual se obtienen manteca y crema doble.

La cantidad del subproducto con bajo contenido de grasa, queda determinado a partir de la leche que se descremó multiplicando por la fracción $ConvL_a$, el cual representa un porcentaje de lo descremado. Para el subproducto con alto contenido de grasa, la cantidad queda determinada a partir de la leche que se descremado, multiplicado por $(1 - ConvL_a)$. A su vez, se debe considerar la posible entrada de crema de leche de las distintas fábricas.

Debido a que la producción de leche en los tambos varía diariamente, no es posible determinar con anticipación la cantidad de leche que producirá un tambo en la semana. Por lo tanto, para el problema se considera una producción semanal estimada. Esto genera que, al modelar una asignación semanal, pueda existir una variación entre lo estimado y lo realmente producido por el tambo.

Una vez que el cliente ingresa la solicitud de un producto, la asignación se realiza por producto/cliente por lo que no se contempla la división de órdenes a nivel de producto. Es decir, la totalidad de un producto solicitado por un cliente debe ser elaborado en una misma fábrica.

Otro punto para considerar es que la cantidad de camiones necesario para transportar leche cruda, crema de leche o producto final en la semana, es un valor estimado. No se considera, dentro del alcance de este trabajo, el problema de ruteo que optimizaría la recolección diaria por cada uno de los tambos o la entrega de los productos a cada uno de los clientes.

En lo que respecta a los traslados, se considera la cantidad de producto a trasladar y la capacidad de cada camión en términos de volumen (ya sea tambo-fábrica, fábrica-fábrica o fábrica-cliente).

A su vez, toda la leche que reciben las fábricas de los tambos debe ser procesada para obtener un producto final, aunque ya se haya cumplido con la demanda de los clientes. Esto significa que las fábricas pueden recibir más leche de la necesaria para cumplir con la demanda asignada de los clientes y ese excedente debe ser procesado para elaborar alguno de los productos.

Con respecto a la crema de leche, tal como sucede en la realidad, es el único producto intermedio que se permite trasladar entre fábricas. A su vez, toda la crema de leche disponible en cada fábrica deberá ser procesada en el correr de la semana.

En cuanto a los tiempos de *setup* por tarea/producto, entendiendo por *setup* a la configuración previa de las máquinas para la correcta ejecución de la tarea, se considera que cada máquina debe realizar un *setup* cada vez que se comienza a fabricar un nuevo producto.

A su vez, se considera que la producción de los distintos productos es continua. Es decir, si una fábrica tiene planificado producir leche entera en el día, no podrá producirla en lotes y deberá seguir con su producción continua hasta terminar la cantidad planificada para dicho día. De acuerdo con estas dos consideraciones, la cantidad de *setups* queda determinada a partir de la cantidad de días necesarios para producir ese producto. Por su parte, para los *setups* correspondientes a los productos derivados de la crema de leche, se considera que aquellas fábricas que deban de producirlos realizan siete *setups* en la semana por tarea/producto.

FORMULACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO GENERAL

El modelo presentado en esta sección tiene como base un problema de optimización multiobjetivo en el cual simultáneamente se minimiza el costo y el tiempo. En este tipo de problemas no existe el concepto de solución óptima, ya que los objetivos generalmente se encuentran en conflicto unos con otros. Para resolver este problema, se toma como referencia lo realizado en [18], donde se aplica el método de la suma ponderada simple para transformar un problema de optimización multiobjetivo, en uno mono-objetivo.

Para aplicar esta técnica, en primer lugar, se debe asociar a cada función objetivo con un coeficiente de peso. Estos coeficientes de peso w_i establecerán la importancia relativa de cada uno de los objetivos. Para estos, se cumple que $w_i > 0 \forall i = 1, \dots, k$ y $\sum_{i=1}^k w_i = 1$, siendo k la cantidad de funciones objetivo del problema.

Para transformar el problema de optimización multiobjetivo en un problema con un solo objetivo, se agregan los distintos objetivos en forma de una suma ponderada.

$$\sum_{i=1}^k w_i \cdot of_i$$

Debido a que puede haber una gran diferencia en la magnitud de las funciones objetivos y sus unidades de medida, no es conveniente que sean sumadas directamente cuando se calcula la función objetivo general. Para resolver este problema, se puede normalizar las distintas funciones objetivo de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$OF_i^- = \begin{cases} \frac{of_{i,max} - of_i}{of_{i,max} - of_{i,min}} & of_{i,max} \neq of_{i,min} \\ 1 & of_{i,max} = of_{i,min} \end{cases}$$

A través de esta se logra escalar las funciones objetivo a un valor real entre 0 y 1. Los términos $of_{i,min}$ y $of_{i,max}$ corresponden a los valores mínimos y máximos que se pueden obtener respectivamente, en la función objetivo i . En otras palabras, $of_{i,max}$ corresponde al peor valor que puede tomar la función objetivo i , mientras que $of_{i,min}$ el mejor.

Al aplicar la suma ponderada de las funciones objetivo normalizadas se obtiene la formulación de la función objetivo general sujeto a todas las restricciones del problema.

$$\min \sum_{i=1}^k w_i \cdot OF_i$$

CONJUNTOS

- P Conjunto de productos con subíndice p .
- $A \subseteq P$ Conjunto de productos fabricados a partir de leche cruda con subíndice a . A es subconjunto de P .
- $B \subseteq P$ Conjunto de productos fabricados a partir de crema de leche con subíndice b . B es subconjunto de P .
- S Conjunto de fábricas con subíndice s .
- M Conjunto de Tambos con subíndice m .
- $K_p \subseteq S$ Conjunto de fábricas calificadas para realizar el producto p , con subíndice k .
- C Conjunto de clientes con subíndice c .
- $H_s \subseteq P$ Conjunto de productos que se pueden realizar en la fábrica s con subíndice h .
- R Conjunto de tareas necesarias para producir todos los productos con subíndice r .
- $D_r \subseteq P$ Conjunto de productos que pasan por la tarea r con subíndice d .

PARÁMETROS

- $Qmax_{sr}$ Capacidad de tiempo disponible máximo para ejecutar la tarea r en la fábrica s (minutos).
- $Qmin_s$ Capacidad de tiempo de la tarea con menor capacidad en la fábrica s (minutos).

| | |
|--------------|--|
| $QPmax_s$ | Volumen máximo admisible de procesamiento semanal de leche en la fábrica s (litros). |
| $Mdays_{pk}$ | Cantidad de días necesarios para producir una unidad del producto p en la fábrica s (días / unidad). |
| $ConvL_a$ | Factor de conversión para pasar de un litro de leche cruda a un litro de producto a . |
| $ConvC_b$ | Factor de conversión para pasar de un litro de crema de leche a una unidad de producto b . |
| $ConvV_p$ | Factor de conversión de una unidad de producto p a volumen ($m^3 / unidad$) |
| QT | Capacidad del camión cisterna tambo – fábrica (litros). |
| QF | Capacidad del camión cisterna fábrica – fábrica (litros). |
| QC | Capacidad camión fábrica – cliente (m^3). |
| L_m | Cantidad de leche, en litros, producida por el tambo m en la semana. |
| dMS_{ms} | Distancia del tambo $m \in M$ a la fábrica s (km). |
| dSC_{sc} | Distancia entre la fábrica $s \in S$ y el cliente c (km). |
| $dSS_{ss'}$ | Distancia entre la fábrica s y la fábrica $s' \in S$ (km). |
| MC_{ps} | Costo de fabricación por unidad del producto p en la fábrica s ($\$/unidad$). |
| MT_{psr} | Tiempo de fabricación del producto p en la tarea r en la fábrica s (minutos / unidad) |
| $MTmax_{pk}$ | Tiempo de fabricación de la tarea más lenta del producto p en la fábrica k |
| TSU_{psr} | Tiempo de <i>setup</i> de la tarea r para realizar el producto p en la fábrica s |
| DM_{pc} | Demanda semanal requerida del producto p por el cliente c (unidades). |
| UCT | Costo unitario de transporte por km ($\$/km$). |

| | |
|-------------|---|
| UTT | Tiempo unitario de transporte por km (min/km). |
| N_1 | Número lo suficientemente grande para la activación de las variables binarias z_{pck} . |
| N_2 | Número lo suficientemente grande para la activación de la variable binaria o_{bk} . |
| U_s | Fracción mínima de capacidad a la que trabajará cada fábrica s . $U \in [0,1]$ |
| DL | Días laborables en todas las fábricas. |
| max_time | Peor valor posible de la variable tiempo. |
| max_cost | Peor valor posible de la variable costo. |
| min_time | Mejor valor posible de la variable tiempo. |
| min_cost | Mejor valor posible de la variable costo. |
| W_c | Ponderación del costo en la función objetivo general $W_c \in [0, 1]$ |
| W_t | Ponderación del tiempo en la función objetivo general $W_t \in [0, 1], W_t = 1 - W_c$ |

VARIABLES

| | |
|---------------------|--|
| $z_{cps} \in [0,1]$ | 1 si el producto p ordenado por el cliente c es fabricado en la fábrica s ; 0 si no. |
| x_{cps} | Cantidad de producto p solicitado para el cliente c a ser elaborado en la fábrica s . |
| y_{ps} | Cantidad de producto p excedente producido por la fábrica s . |
| v_{ms} | Número estimado de viajes que debe hacer el camión m para transportar toda la leche producida en la semana a la fábrica s , considerando la capacidad del camión cisterna. |

| | |
|--------------------|---|
| w_{sc} | Cantidad estimada de viajes que se deben hacer entre la fábrica s y el cliente c , para transportar todos los productos fabricados para este cliente, considerando la capacidad del camión. |
| $u_{ss'}$ | Cantidad estimada de viajes que se deben hacer para llevar toda la crema de leche de la fábrica s a la fábrica s' , considerando la capacidad del camión cisterna. |
| q_{ms} | Volumen de leche enviada del tambo m a la fábrica s (litros). |
| cl_s | Volumen de crema de leche disponible en la fábrica s (litros). |
| $e_{ss'}$ | Volumen de crema de leche enviada de la fábrica s a la fábrica s' (litros). |
| f_{pk} | Cantidad de días laborables necesarios para cumplir con la producción del producto p en la fábrica k . |
| $o_{bk} \in [0,1]$ | 1 si el producto b es fabricado en la fábrica k ; 0 si no. |
| $cost$ | Costo total de fabricación de la totalidad de productos en el conjunto de fábricas (\$). |
| $time$ | Tiempo total de fabricación de la totalidad de productos en el conjunto de fábricas (minutos). |

FUNCIÓN OBJETIVO

$$\min W_c \left(\frac{\text{cost} - \text{min_cost}}{\text{max_cost} - \text{min_cost}} \right) + W_t \left(\frac{\text{time} - \text{min_time}}{\text{max_time} - \text{min_time}} \right) \quad (1)$$

s. a:

$$\begin{aligned} \text{cost} = & \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K_p} MC_{pk} \cdot x_{cpk} + \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} UCT \cdot v_{ms} \cdot dMS_{ms} \\ & + \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} UCT \cdot w_{sc} \cdot dSC_{sc} + \sum_{s \in S} \sum_{k \in S} UCT \cdot u_{ss'} \cdot dSS_{ss'} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{time} = & \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K_p} x_{cpk} \cdot MTmax_{pk} + \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} UTT \cdot v_{ms} \cdot dMS_{ms} \\ & + \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} UTT \cdot w_{sc} \cdot dSC_{sc} + \sum_{s \in S} \sum_{k \in S} UTT \cdot u_{ss'} \cdot dSS_{ss'} \end{aligned} \quad (3)$$

$$N_1 \cdot \sum_{k \in K_p} z_{pck} \geq DM_{pc}, \quad \forall c \in C, p \in P \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K_p} z_{pck} \leq DM_{pc}, \quad \forall c \in C, p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K_p} z_{pck} \leq 1, \quad \forall c \in C, p \in P \quad (6)$$

$$z_{cpk} \cdot DM_{pc} = x_{cpk}, \quad \forall c \in C, p \in P, k \in K_p \quad (7)$$

$$\sum_{s \in S} q_{ms} = L_m, \quad \forall m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{a \in H_s \cap A} \frac{x_{cas}}{ConvL_a} + \sum_{a \in H_s \cap A} \frac{y_{as}}{ConvL_a} \leq \sum_{m \in M} q_{ms}, \quad \forall s \in S \quad (9)$$

$$cl_s = \sum_{c \in C} \sum_{a \in H_s \cap A} x_{cas} \cdot \frac{1 - ConvL_a}{ConvL_a} + \sum_{a \in H_s \cap A} y_{as} \cdot \frac{1 - ConvL_a}{ConvL_a} + \sum_{k \in S \setminus \{s\}} e_{ks}, \quad \forall s \in S \quad (10)$$

$$cl_s = \sum_{c \in C} \sum_{b \in H_s \cap B} \frac{x_{cbs}}{ConvC_b} + \sum_{b \in H_s \cap B} \frac{y_{bs}}{ConvC_b} + \sum_{k \in S \setminus \{s\}} e_{sk}, \quad \forall s \in S \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M} q_{ms} \leq QPmax_s, \quad \forall s \in S \quad (12)$$

$$v_{ms} \geq \frac{q_{ms}}{QT} \quad (13)$$

$$u_{ss'} \geq \frac{e_{ss'}}{QF} \quad (14)$$

$$w_{sc} \geq \frac{\sum_{p \in P} x_{cps} \cdot ConvV_p}{QC} \quad (15)$$

$$\sum_{p \in H_s} \sum_{c \in C} x_{cps} \cdot MTmax_{ps} \geq U \cdot Qmin_s, \quad \forall s \in S \quad (16)$$

$$f_{ak} \geq (y_{ak} + \sum_{c \in C} x_{cak}) Mdays_{ak}, \quad \forall a \in A, k \in K_a \quad (17)$$

$$f_{ak} \leq (y_{ak} + \sum_{c \in C} x_{cak}) Mdays_{ak} + 1, \quad \forall a \in A, k \in K_a \quad (18)$$

$$f_{bk} = o_{bk} \cdot 7, \quad \forall b \in B, k \in K_b \quad (19)$$

$$o_{bk} \cdot N_2 \geq y_{bk} + \sum_{c \in C} x_{cbk}, \quad \forall b \in B, k \in K_b \quad (20)$$

$$o_{bk} \leq y_{bk} + \sum_{c \in C} x_{cbk}, \quad \forall b \in B, k \in K_b \quad (21)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in D_r \cap H_s} x_{cps} \cdot MT_{psr} + \sum_{p \in D_r \cap H_s} (f_{ps} \cdot TSU_{psr} + y_{ps} \cdot MT_{psr}) \leq Qmax_{sr}, \quad \forall s \in S, r \in R \quad (22)$$

$$x_{pck}, q_{ms}, c_s, e_{sk}, v_{ms}, h_{ss'}, o_{sc} \geq 0, \quad \forall p \in P, s, s' \in S, k \in S, c \in C, m \in M \quad (23)$$

$$cost, time \geq 0 \quad (24)$$

$$z_{pck} \in [0,1] \quad (25)$$

Como se muestra en (1) la función objetivo general minimiza los costos y tiempos normalizados. Las restricciones (2) y (3) corresponden al costo y tiempo respectivamente. Consideran la sumatoria de cada uno de los factores que afectan el valor de estas, es decir, todo tipo de transporte necesario en el proceso productivo (tambo-fábrica, fábrica-fábrica, fábrica-cliente) y la propia fabricación del producto en la fábrica.

El conjunto de restricciones (4) se utiliza para producir la totalidad de las órdenes realizadas por cada uno de nuestros clientes.

El conjunto (5) indica que, si la demanda de un producto particular para un cliente en una fábrica específica es nula, la variable correspondiente (z_{pck}) también tiene que ser nula.

Las restricciones (6) son utilizadas para que la fabricación de cada pedido de producto de un cliente sea realizada en una única fábrica.

Las restricciones (7) definen las variables x_{pck} . En caso de que una orden producto/cliente vaya a producirse en una fábrica específica, dicha fábrica producirá toda la demanda de ese producto/cliente.

El conjunto de restricciones (8) indica que toda la leche producida por los tambos debe ser enviada a las fábricas.

En las restricciones (9), la leche que recibe cada una de las fábricas debe corresponder a la cantidad de leche cruda utilizada para producir los productos derivados de la misma. Estos productos pueden ser producidos para cumplir con la demanda exigida o, simplemente, para procesar la totalidad de la leche recibida.

En el conjunto de restricciones (10) se define que la crema de leche disponible en la fábrica corresponde al sobrante que se obtiene al descremar la leche cruda (ya sea para satisfacer la demanda o para producir la totalidad de la leche) más lo recibido de otras fábricas.

Las restricciones (11) indican que la crema de leche también debe corresponder a lo utilizado para la fabricación de los productos derivados de la misma (ya sea para satisfacer la demanda o para procesar la totalidad de la crema de leche) más lo enviado a otras fábricas.

La familia de restricciones (12) limita la cantidad de leche recibida de los tambos en cada fábrica. Esta cantidad tiene como cota superior la capacidad de almacenamiento de leche cruda.

Los conjuntos de restricciones (13), (14) y (15) indican que la cantidad de viajes debe ser mayor a la cantidad de leche o producto a enviar (considerando factor de volumetría) sobre la capacidad del camión.

Las restricciones (16) fija la producción mínima de órdenes, en términos de tiempo, que deberán ser asignadas a las distintas fábricas. Para esto, se define el porcentaje mínimo de utilización (U) de la tarea con menor capacidad en cada una de las fábricas.

Los conjuntos de restricciones (17) y (18), definen la cantidad mínima de días que necesito para producir la cantidad asignada de cada producto en cada fábrica.

La familia de restricciones (19) define que, como cota superior, para todos los productos b elaborados en k , se considerarán 7 días de fabricación.

El conjunto de restricciones (20), corresponden a la activación de o_{bk} siempre mientras que el (21) limita el valor de la o_{bk} en caso de que el producto no sea producido en la fábrica k .

Las restricciones (22) consideran los tiempos de fabricación por tarea/producto en cada fábrica y los tiempos de *setup* asociados a los mismos (definidos en función de la cantidad de días necesarios para la fabricación) de manera tal que la suma de ambos sea menor a la capacidad máxima de cada tarea en cada fábrica.

Por último, las restricciones (23), (24) y (25) son restricciones de dominio.

5.2.1. Validación

A continuación, se describen los casos de validación que consideremos más importantes. En la Anexo II se podrá visualizar el resto de las validaciones realizadas.

Para la validación, y con la finalidad de hacer sencilla la predicción de la solución, se consideraron conjuntos reducidos. Al menos que se especifique lo contrario, se tendrán dos clientes y dos fábricas. El conjunto de productos permanece inalterado, cuatro productos de los cuales dos se fabrican a partir de leche cruda y otros dos se fabrican a partir de crema de leche. Cabe destacar que, los productos que se fabrican a partir de leche cruda se pueden realizar en ambas fábricas, pero los que se fabrican a partir de crema de leche se pueden realizar uno en cada fábrica.

Por su lado, habrá dos tambos que pueden abastecer a cualquiera de las dos fábricas. A su vez, no se considera asignación mínima a cada fábrica, por lo que el parámetro U tendrá valor 0, al menos que se especifique lo contrario. Por último, los parámetros W_c y W_r tendrán el valor de 0.5.

CASO 1: Demanda Nula - Capacidad de almacenamiento de leche cruda suficiente

Se busca analizar el caso en que la demanda solicitada por los clientes es nula. Es decir, que los clientes no realicen ningún pedido en la semana, pero que igual se debe asignar la leche producida por los tambos.

En este caso se espera que la salida del modelo sea tal que recomiende el envío de la leche a la fábrica más cercana sin asignar producción a la misma. Es decir, que el conjunto de variables x tomen valor 0, mientras que la leche que envíen los tambos, representada por la variable q , sea igual a la leche producida en los tambos.

Los resultados indican que la leche de ambos tambos se envía a la fábrica más cercana y que la producción en ambas fabricas es nula.

Los parámetros y variables del modelo se encuentran en la Tabla 1. En la misma se puede observar sólo los parámetros y variables relevantes para esta validación (criterio que se toma para el resto de las tablas que se presentan en la validación).

Tabla 1. Modelo de asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 1.

| PARÁMETROS | | | | | | |
|------------|------|-------|------------|----|-------|---------|
| Tambos | | L_m | dMS_{ms} | | Utarg | Ala |
| T1 | 1000 | | T1 | 10 | 100 | |
| T2 | 200 | | T2 | 10 | 100 | |
| QT | | 500 | dSC_{sc} | | Salto | Colonia |
| | | | Utarg | 7 | 400 | |
| | | | Ala | 7 | 400 | |
| VARIABLES | | | | | | |
| q_{ms} | | Utarg | v_{ms} | | Utarg | Ala |
| T1 | 1000 | 0 | T1 | 2 | 0 | |
| T2 | 0 | 200 | T2 | 0 | 1 | |

En este caso particular, se presentan los valores de los parámetros correspondientes a: cantidad de leche producida por cada uno de los tambos (L_m), capacidad de transporte del camión tambo-fábrica (QT), distancias tambos-fábricas (dMS_{ms}) y distancia fábricas-clientes (dSC_{sc}). Por su parte, las variables presentadas de este caso de validación son: cantidad de leche que envían los tambos a las fábricas (q_{ms}) y el estimado de camiones necesarios para el traslado de esta (v_{ms}).

A partir de este caso de validación, se elimina la siguiente familia de restricciones que se encontraba en un comienzo en el modelo:

$$\sum_{c \in C} \sum_{a \in A} z_{acs} \cdot F \leq \sum_{m \in M} q_{ms}, \quad \forall s \in S$$

El objetivo de esta era que la leche producida por los tambos se enviara únicamente a aquellas fábricas que iban a producir leche (descremada o entera). Esto provocaba que al tener demanda cero, la corrida no arrojara solución factible.

También a partir de este caso de validación, se define el parámetro $QPmax$ que representa la capacidad máxima de almacenamiento en litros de leche, que tiene la fábrica. Este parámetro, incluido en el nuevo conjunto de restricciones $\sum_{m \in M} q_{ms} \leq QPmax_s, \forall s \in S$, limita la cantidad de leche cruda que puede recibir la fábrica en función de su capacidad e independientemente a la demanda a satisfacer por la propia fábrica.

CASO 2: Transferencia entre fábricas

Para este caso, se ingresan los valores de los parámetros de manera tal que la salida del modelo sugiera la transferencia entre las fábricas. Para lograr esto, una fábrica estará enfocada en la producción de los productos derivados de la leche cruda y la otra en la de los de crema de leche.

La demanda es tal que la leche cruda deba ser enviada en su totalidad a la fábrica que procesa la leche cruda, exigiendo así la transferencia de la crema de leche dicha fábrica a la otra.

Tabla 2. Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 2

PARÁMETROS

| Tambos | L_m |
|--------|-------|
| T1 | 1000 |
| T2 | 200 |

| dSC_{sc} | Salto | Colonia |
|------------|-------|---------|
| Utarg | 40 | 40 |
| Ala | 400 | 400 |

| MT_{ps} | Utarg | Ala |
|------------------|-------|-----|
| Leche Entera | 0,2 | 1,5 |
| Leche Descremada | 0,2 | 1,6 |
| Crema Doble | 1 | 5 |
| Manteca | 1 | 5 |

| MC_{ps} | Utarg | Ala |
|------------------|-------|-----|
| Leche Entera | 5 | 50 |
| Leche Descremada | 5 | 50 |
| Crema Doble | 8 | 80 |
| Manteca | 8 | 80 |

| DM_{pc} | Colonia | Salto |
|------------------|---------|-------|
| Leche Entera | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 500 | 580 |
| Crema Doble | 10 | 10 |
| Manteca | 5 | 5 |

| Producto | K_p |
|------------------|-------|
| Leche Entera | Ala |
| Leche Descremada | Ala |
| Crema Doble | Utarg |
| Manteca | Utarg |

VARIABLES

| Cliente | Producto | Fábrica | x_{pck} |
|---------|------------------|---------|-----------|
| Colonia | Crema Doble | Ala | 0 |
| Colonia | Crema Doble | Utarg | 10 |
| Colonia | Leche Descremada | Ala | 500 |
| Colonia | Leche Descremada | Utarg | 0 |
| Colonia | Leche Entera | Ala | 0 |
| Colonia | Leche Entera | Utarg | 0 |
| Colonia | Manteca | Ala | 0 |
| Colonia | Manteca | Utarg | 5 |
| Salto | Crema Doble | Ala | 0 |
| Salto | Crema Doble | Utarg | 10 |
| Salto | Leche Descremada | Ala | 580 |
| Salto | Leche Descremada | Utarg | 0 |
| Salto | Leche Entera | Ala | 0 |
| Salto | Leche Entera | Utarg | 0 |
| Salto | Manteca | Ala | 0 |

| | | | |
|-------|---------|-------|---|
| Salto | Manteca | Utarg | 5 |
|-------|---------|-------|---|

| Fábrica (s) | Fábrica (k) | e_{sk} |
|-------------|-------------|----------|
| Utarg | Ala | 120 |
| Ala | Utarg | 0 |

| c_s | Ala | Utarg |
|-------|-----|-------|
| | 120 | 120 |

En la Tabla 2, se presentan los valores de los parámetros correspondientes a: cantidad de leche producida por cada tambo (L_m), distancia fábrica-cliente (dSC_{sc}), tiempo de fabricación de cada producto en cada fábrica (MT_{ps}), costo de fabricación de cada producto en cada fábrica (MC_{ps}), demanda por producto/cliente (DM_{pc}) y fábricas calificadas para la producción de los distintos productos (K_p). En cuanto a los valores de las variables obtenidas, se presentan: las cantidades de cada producto elaborado por cada fábrica para cada cliente (x_{pcs}), cantidad de crema de leche transportada entre fábricas (e_{sk} , siendo s la fábrica de origen y k la fábrica destino) y cantidad de crema de leche disponible en cada fábrica (c_s).

Como era esperado, la salida del modelo indica que la totalidad de la leche de los tambos se envía a Ala (fábrica que se determinó como “procesadora de leche cruda”). Luego, la misma realiza el envío de la crema de leche a Utarg para la fabricación de crema doble y manteca.

A partir de este caso de validación, se redefinió la variable c_s que corresponde a la crema de leche disponible en la fábrica s , para la producción de los productos del conjunto B .

La misma pasa a componerse de 3 factores: subproducto que se obtiene al descremar la leche cruda, a lo recibido de otras fábricas y se agrega el descremado dirigido exclusivamente a la producción de crema de leche.

$$c_s = (1 - Cmin) \left(\sum_{m \in M} q_{ms} - \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \frac{x_{acs}}{ConvL_a} \right) + \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} x_{acs} \frac{(1 - ConvL_a)}{ConvL_a} + \sum_{k \in S \setminus \{s\}} e_{ks}, \quad \forall s \in S$$

En base a este cambio, se define un nuevo parámetro $Cmin$ que corresponderá al menor factor de conversión de los productos derivados de la leche cruda. Es decir, el que maximiza la obtención de Crema de Leche).

CASO 3: Validación trabajo máximo en cada fábrica

En este caso, se busca limitar la cantidad máxima de un producto que puede ser asignado a una fábrica. Se solicita una demanda mayor a la que la fábrica puede asumir, en base a las horas laborables de la semana y los tiempos de producción, para que al resolver el modelo no encuentre una solución factible.

En particular, se solicitan 330 unidades de manteca que solo pueden ser fabricadas en una fábrica, la cual cuenta con 3360 horas laborables en la semana. A su vez, el tiempo de fabricación de la tarea más lenta (Envasado Manteca) y su tiempo de *setup* (uno para cada día), son ambos 10 minutos. De esta forma, el modelo no debería tener una solución factible.

Tabla 3. Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 3.

| PARÁMETROS | | | | | |
|------------------|-------------|-------------|------------------|---------|-------|
| K_p | | | DM_{pc} | | |
| | Utarg | Ala | | Colonia | Salto |
| Leche Descremada | 1 | 1 | Leche Descremada | 0 | 0 |
| Leche Entera | 1 | 1 | Leche Entera | 0 | 0 |
| Crema Doble | 1 | 0 | Crema Doble | 0 | 0 |
| Manteca | 0 | 1 | Manteca | 330 | 0 |
| MT_{pc} | | | $Qmin_s$ | | |
| | Colonia | Salto | | Utarg | Ala |
| Leche Descremada | 0 | 0 | | 3360 | 3360 |
| Leche Entera | 0 | 0 | TSU_{psr} | | |
| Crema Doble | 0 | 0 | Envasado Manteca | | |
| Manteca | 0 | 10 | Ala | 10 | |
| | | | Manteca | | |
| VARIABLES | | | | | |
| q_{ls} | | | x_{pck} | | |
| | Utarg | Ala | No Factible | | |
| T1 | No Factible | No Factible | | | |
| T2 | No Factible | No Factible | | | |

En la Tabla 3, se presentan los valores de los parámetros correspondientes a: fábricas calificadas para la producción de los distintos productos (K_p), demanda por producto/cliente (DM_{pc}), tiempo de fabricación de cada producto en cada fábrica (MT_{ps}), capacidad de fabricación, en minutos, por fábrica ($Qmin_s$) y los tiempos de set-up por fábrica, producto tarea (TSU_{psr}). En este caso se valida que a través del modelo planteado el caso planteado no tiene solución factible.

En una versión anterior del modelo, no se consideraba los tiempos de cada tarea ni sus respectivos tiempos de *setup*. En este caso de validación, los parámetros ingresados corresponden a una capacidad semanal de la fábrica de 3360 minutos y el tiempo de

producir una unidad de manteca es de 10 minutos. Por lo tanto, lo máximo que podría producir es 336 unidades de manteca. Sin embargo, cuando se corrió la versión anterior del modelo, frente a una demanda de 340 unidades de manteca, el mismo tuvo solución factible y asignaba la producción a una fábrica.

A partir de esto, para asegurarse que toda la demanda asignada a una fábrica puede ser producida, se restringe la capacidad máxima de cada tarea en la semana. Esto se logró agregando o modificando los siguientes conjuntos, parámetros y restricciones al modelo.

CONJUNTOS

R Conjunto de tareas necesarias para producir todos los productos con subíndice r .

$D_r \subseteq P$ Conjunto de productos que pasan por la tarea r con subíndice d .

PARÁMETROS

$Qmax_{sr}$ Capacidad máxima semanal en la tarea r de la fábrica s en minutos.

$Qmin_s$ Capacidad de la tarea con menor capacidad de la fábrica s en minutos.

$QPmax_s$ Capacidad máxima semanal para procesamiento de leche (en litros).

RESTRICCIONES

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} x_{pcs} \cdot MTmax_{ps} \geq U \cdot Qmin_s, \quad \forall s \in S \quad (16)$$

$$f_{pk} = \sum_{c \in C} \frac{x_{pck} \cdot MTmax_{pk} \cdot DL}{Qmin_k}, \quad \forall p \in P, k \in K_p \quad (17)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in D_r \cap H_s} x_{pcs} \cdot MT_{psr} + \sum_{p \in D_r \cap H_s} f_{ps} \cdot TSU_{psr} \leq Qmax_{sr}, \quad \forall s \in S, r \in R \quad (18)$$

CASO 4: Validación trabajo mínimo de la fábrica

El objetivo es validar el correcto funcionamiento del parámetro U , el cual fue definido en el conjunto de restricciones (16). Para este análisis, se iguala distancias y costos de fabricación, mientras que los valores del tiempo de producción son distintos en cada fábrica.

Tabla 4. Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 4.

| PARÁMETROS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------|----|-------------|---|-----|------------|---|--|---------|-----------|-------|--------------|-----|--------------|
| $MTmax_{ps}$ | Utarg | Ala | | DM_{pc} | | | | | | | | | | | | | | | |
| Leche Descremada | 0,8 | 0,2 | | Leche Descremada | 400 400 | | | | | | | | | | | | | | |
| Leche Entera | 0,8 | 0,4 | | Leche Entera | 400 400 | | | | | | | | | | | | | | |
| Crema Doble | 1,5 | 0,5 | | Crema Doble | 40 40 | | | | | | | | | | | | | | |
| Manteca | 1,5 | 0,5 | | Manteca | 20 20 | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Tambo</th> <th>L_m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T1</td> <td>6000</td> </tr> <tr> <td>T2</td> <td>2000</td> </tr> </tbody> </table> | | | Tambo | L_m | T1 | 6000 | T2 | 2000 | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>U</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,1</td> </tr> </tbody> </table> | U | 0,1 | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Fábrica</th> <th>$QPmax_s$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Utarg</td> <td>10000</td> </tr> <tr> <td>Ala</td> <td>10000</td> </tr> </tbody> </table> | | Fábrica | $QPmax_s$ | Utarg | 10000 | Ala | 10000 |
| Tambo | L_m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T1 | 6000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T2 | 2000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| U | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fábrica | $QPmax_s$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Utarg | 10000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ala | 10000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| VARIABLES | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| q_{ms} | Utarg | Ala | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T1 | 0 | 6000 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T2 | 2000 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cliente | Producto | Fábrica | x_{pcs} | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Colonia | Crema Doble | Ala | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Colonia | Crema Doble | Utarg | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Colonia | Leche Descremada | Ala | 400 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Colonia | Leche Descremada | Utarg | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Colonia | Leche Entera | Ala | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Colonia | Leche Entera | Utarg | 400 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Colonia | Manteca | Ala | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Colonia | Manteca | Utarg | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Salto | Crema Doble | Ala | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Salto | Crema Doble | Utarg | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Salto | Leche Descremada | Ala | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Salto | Leche Descremada | Utarg | 400 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Salto | Leche Entera | Ala | 400 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Salto | Leche Entera | Utarg | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Salto | Manteca | Ala | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Salto | Manteca | Utarg | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |

En la Tabla 4, se presentan los valores de los parámetros correspondientes a: tiempo máximo de tarea de cada producto en cada fábrica ($MTmax_{ps}$), demanda producto/cliente (DM_{pc}), cantidad de leche producida por cada tambo (L_m), utilización mínima de la capacidad de producción de cada fábrica (U) y capacidad máxima de procesamiento de leche ($QPmax_s$). En cuanto a los valores de las variables obtenidas a través del modelo, se presenta: la cantidad de leche enviada desde cada tambo a cada una de las fábricas (q_{ms}) y las cantidades de cada producto elaborado por cada fábrica para cada cliente (x_{pcs}).

Como se puede observar en la variable de cantidad de producto elaborado por cada fábrica, luego de ejecutado el modelo sugiere la fabricación de la Leche Entera para Colonia en Ala, a pesar de tener tiempos de fabricación mayores a los de Utarg. Esto sucede para cumplir con el mínimo de utilización de ambas fábricas, que en este caso es 10%. Recordamos que la fábrica debe elaborar el pedido completo del cliente, ya que no se contempla dividir los pedidos.

5.2.2. Pruebas de estrés

Se realizaron pruebas de estrés con el objetivo de determinar el tamaño máximo de los conjuntos tal que los tiempos de ejecución del solver sean aceptables. Debido a las características del modelo y los propósitos de su utilización, se considera un máximo de 8 horas, como un tiempo razonable. Para ello, se plantearon tres escenarios, en los cuales se aumenta gradualmente la cantidad de fábricas, tambos y clientes.

Las pruebas se realizaron en un intérprete de Python, ejecutando un programa desarrollado internamente, donde se crea una instancia de AMPL a la cual se le carga el modelo matemático y los parámetros correspondientes. Se utilizó una computadora con procesador Intel Core i5-6200U CPU 2.4GHz con 8GB de memoria RAM.

Para el primer caso de estudio, se hizo variar la cardinalidad de los tres conjuntos considerados, los cuales fueron aumentando exponencialmente en potencia de dos. Se comenzó con 10 fábricas, 50 tambos y 100 clientes y se fue incrementando la cantidad hasta llegar a tiempos de ejecución mayores a 8 horas. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8, donde N refiere al valor entero por el cual se multiplica la cardinalidad de los conjuntos S, C y M.

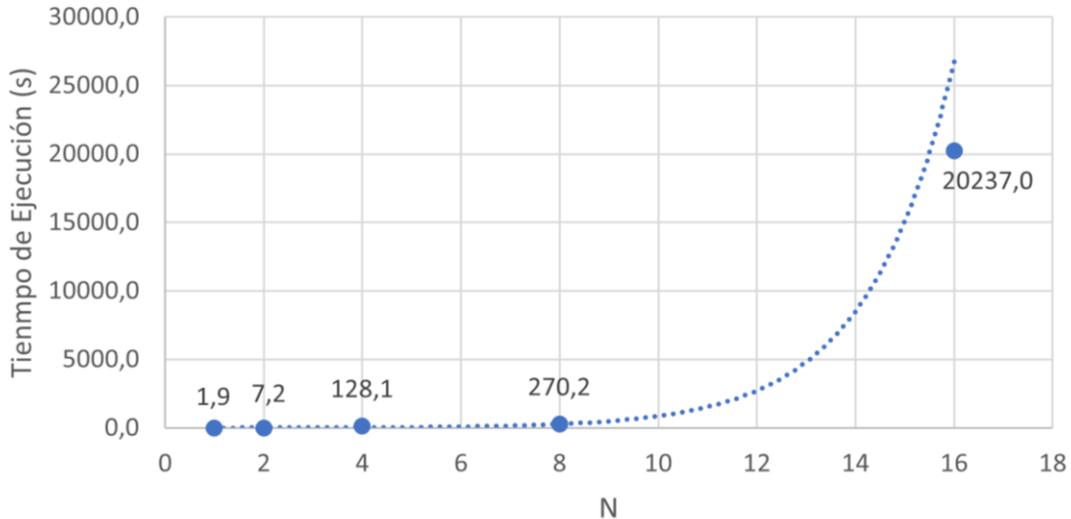


Figura 8. Prueba de Estrés - Variación de fábricas, clientes y tambos.

Como se puede observar, a medida que aumenta el tamaño de los distintos conjuntos, los tiempos de ejecución crecen de forma exponencial.

En el segundo caso de estudio, se fijó la cantidad de fábricas y clientes mientras que se incrementó la cantidad de tambos. De este estudio se concluye que el solver logra encontrar una solución óptima en un tiempo menor a 10 minutos, cuando se consideran 5 fábricas, 10 clientes y hasta 5000 tambos.

Por último, se aumenta la cantidad de clientes dejando fijos los conjuntos de tambos y fábricas. En el análisis, se consideraron 5 fábricas, 100 tambos y hasta 45.000 clientes, para el cual el tiempo de ejecución del solver fue de aproximadamente 9 horas y 20 minutos.

En el Anexo III, se muestran los resultados obtenidos en los dos casos descritos anteriormente.

5.3. Formulación del Modelo Matemático: Modelo de Planificación

Este modelo toma determinados valores de la solución obtenida a través del modelo de asignación, para luego planificar la producción semanal de cada fábrica. En particular, la demanda que tendrá cada fábrica será la asignada por el modelo anterior.

A diferencia del modelo de asignación, el cual contempla las características de todas las fábricas, este modelo considera a cada fábrica por separado y planificar su producción.

El modelo propuesto considera las fechas de entrega solicitadas por los clientes al momento de realizar el pedido. A partir de esto, dentro de las consideraciones de la plataforma se debe tener en cuenta que, por más que el cliente puede cargar una fecha de entrega deseada, el sistema asegura la entrega de las órdenes para el último día de la semana.

De todas formas, se busca planificar la producción diaria de las órdenes previamente asignadas, considerando las fechas definidas por los clientes. El modelo propuesto representa esta problemática en una fábrica y tiene como objetivo minimizar los retrasos en las entregas de estas órdenes.

Para realizar la planificación asignada, se tomará en cuenta los tiempos de producción, así como los de *setup*.

En primer lugar, se detallan las consideraciones respecto a cómo será la integración de los modelos. Como fue explicado en la Sección 5.1, la leche recibida de tambos y crema de leche recibida de otras fábricas en la semana quedará definida por las variables q_{ms} y e_{sk} respectivamente. Para el caso de la leche cruda, lo recibido en cada período se definirá como el total resultante del modelo de asignación dividido el total de períodos (días), es decir, todos los días se recibirá lo mismo de leche cruda. En cuanto a la crema de leche se considera que cada fábrica recibirá el total determinado por el modelo anterior, el primer día de la semana.

Por otro lado, se considera que toda la leche recibida en un determinado período debe ser procesada en el correr del mismo. Esto implica que lo único que se puede almacenar al final del período es producto terminado o crema de leche.

Se mantienen las consideraciones respecto al procesamiento de leche cruda, definiendo, al igual que en el modelo de asignación, una variable para la producción destinada al cumplimiento de las órdenes y otra para el procesamiento total de la leche (independientemente que sea para la obtención de crema de leche o no).

Con relación a los tiempos de *setup*, si se decide fabricar un producto en el período t , el mismo se realiza de manera continua. Es decir, si para un mismo período se produce leche entera y descremada, primero se fabricará un producto por completo y luego el otro. A raíz de esta consideración, los tiempos de *setup* de cada máquina r se tomarán en cuenta una sola vez por cada producto p procesado en ese período.

Con respecto a la crema de leche, se considera que la misma puede ser acumulada período a período. Por lo tanto, la crema de leche disponible en un periodo en particular queda determinado por lo acumulado en los periodos anteriores y lo obtenido por procesar la leche en ese periodo. Lo que sí debe mantenerse es que, al final de la semana, toda la crema de leche debe ser procesada para obtener alguno de sus subproductos.

En lo que refiere al atraso de las órdenes, se considerará como atraso a toda aquella cantidad de producto/pedido que no pudo ser elaborada para su período de entrega solicitado. Es decir, que el atraso comenzará a partir de la fecha de entrega. Para el final de la semana, los productos elaborados para cumplir con la demanda de cada cliente, considerando lo elaborado antes de la fecha de entrega solicitada y lo atrasado, deberá ser igual a lo demandado.

CONJUNTOS

P Conjunto de productos con subíndice p .

$A \subseteq P$ Conjunto de productos fabricados a partir de leche cruda con subíndice α .
 A es subconjunto de P .

| | |
|-----------------|--|
| $B \subseteq P$ | Conjunto de productos fabricados a partir de crema de leche con subíndice b . B es subconjunto de P . |
| E | Conjuntos ordenados de tareas necesarias para realizar la totalidad de los productos con subíndice e . |
| R_p | Conjunto ordenado de tareas necesarias para la fabricación de cada producto particular con subíndice r . |
| H_e | Conjunto de productos que se pueden realizar en cada tarea. |
| T | Conjunto ordenado de períodos con subíndice t , toma los valores de 1 hasta T . |
| C | Conjunto de clientes con subíndice c . |

PARÁMETROS

A continuación, presentamos los parámetros utilizados para este modelo:

| | |
|------------|---|
| TSU_{ep} | Tiempo de <i>setup</i> de la por tarea e para el producto p . |
| L_t | Leche recibida de los tambos en el período t . |
| CL_t | Crema de leche recibida en el período t . |
| MT_{ep} | Tiempo de fabricación de la tarea e , para el producto p por unidad producida. |
| DM_{pc} | Demanda del producto p ordenada por el cliente c . |
| $ConvL_a$ | Factor de Conversión: Cantidad de unidades del producto a obtenidas a partir del descremado de una unidad de leche cruda. |
| $ConvC_b$ | Factor de Conversión: Cantidad de unidades del producto b obtenidas a partir de una unidad de crema de leche. |
| Q_e | Disponibilidad diaria en horas para la realización de cada tarea. |
| FE_{pc} | Fecha de entrega para el producto p solicitada por el cliente c . |

- N Demanda máxima del producto p solicitada por el cliente c . Utilizado para la activación de las variables z_{pc} .
- M Entero utilizado para la activación de las variables w_{prt} . Se define como la máxima capacidad de producción para todas las tareas r y productos p .
- U Representa la cardinalidad del conjunto R .

VARIABLES

- x_{prtc} Cantidad del producto p solicitado por el cliente c procesado en la tarea r que se realiza en el período t .
- y_{prt} Cantidad del producto p procesado en la tarea r que se realiza en el período t que no corresponde a ninguna orden.
- c_t Cantidad de crema de leche disponible en el período t .
- l_{pct} Cantidad de producto p necesaria para completar la orden del cliente c en el periodo t para la fecha de entrega establecida.

$w_{prt} \in [0,1]$ 1 si en el período t , produzco el producto p ; 0 si no.

FUNCIÓN OBJETIVO

$$\min \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} l_{pct} (t + 1 - FE_{pc}) \quad (1)$$

s. a:

$$\sum_{p \in H_e} \sum_{c \in C} (x_{petc} + y_{pet}) MT_{pe} + \sum_{p \in H_e} w_{pet} \cdot TSU_{ep} \leq Q_e, \quad \forall e \in E, t \in T \quad (2)$$

$$(x_{prtc} - x_{p,r-1,t,c}) = 0, \quad \forall p \in P, t \in T, c \in C, \quad r \in R_p / ord(r) > 1 \quad (3)$$

$$(y_{prt} - y_{p,r-1,t}) = 0, \quad \forall p \in P, t \in T, r \in R_p / ord(r) > 1 \quad (4)$$

$$\sum_{t \in T} x_{prtc} = DM_{pc}, \quad \forall p \in P, c \in C, r \in R_p \quad (5)$$

$$\sum_{a \in A} \sum_{c \in C} \frac{x_{aetc}}{ConvL_a} + \sum_{a \in A} \frac{y_{aet}}{ConvL_a} = L_t, \quad \forall e \in E, t \in T / ord(e) = 1 \quad (6)$$

$$c_t = L_t - \sum_{a \in A} \sum_{c \in C} x_{aetc} - \sum_{a \in A} y_{aet} + CL_t, \quad \forall e \in E, t \in T / ord(e) = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^{t=t'} \sum_{b \in B} \sum_{r \in R_b / ord(r) = U} \left(\sum_{c \in C} \frac{x_{brtc}}{ConvC_b} + \frac{y_{brt}}{ConvC_b} \right) \leq \sum_{t=1}^{t=t'} c_t, \quad \forall t' \in T \quad (8)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{b \in B} \sum_{r \in R_b / ord(r) = U} \left(\sum_{c \in C} \frac{x_{brtc}}{ConvC_b} + \frac{y_{brt}}{ConvC_b} \right) = \sum_{t \in T} c_t \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^{t=FE_{pc}} x_{prtct} + l_{pct} = DM_{pc}, \quad \forall c \in C, p \in P, r \in R_p / ord(r) = U \quad (10)$$

$$l_{pct} = 0, \quad \forall p \in P, c \in C, t \in T / t < FE_{pc} \quad (11)$$

$$l_{pct-1} - x_{prtct} = l_{pct}, \quad \forall p \in P, c \in C, t \in T / ord(r) = U, t > FE_{pc} \quad (12)$$

$$w_{prt} \cdot M \geq \sum_{c \in C} x_{prtct} + y_{prt}, \quad \forall p \in P, t \in T, r \in R_p \quad (13)$$

$$w_{prt} \leq \sum_{c \in C} x_{prtct} + y_{prt}, \quad \forall p \in P, t \in T, r \in R_p \quad (14)$$

$$x_{prtct}, y_{prt}, c_t, l_{pct} \geq 0, \quad \forall p \in P, r \in R_p, t \in T, c \in C \quad (15)$$

En (1) se presenta la función objetivo que minimiza los retrasos en las entregas de las órdenes, según la fecha solicitada por los clientes.

El conjunto de restricciones (2) busca limitar la cantidad procesada en cada período por cada tarea, tal que la misma no sea mayor a la capacidad de la fábrica en dicha tarea. Estas consideran los tiempos de producción y los tiempos de *setup*.

En la familia de restricciones (3) se plantea, para cada período, un balance entre tareas consecuentes para los productos solicitados por los clientes. Es decir, que la cantidad procesada de un producto en una tarea debe ser igual a la procesada en la tarea inmediatamente anterior. Lo mismo para el conjunto de restricciones (4), solo que considerando las variables y_{prt} .

Con las restricciones (5) se establece que la cantidad a producir de cierto producto para un cliente en la semana debe ser igual a lo demandado por el mismo. Cabe mencionar que esta restricción no toma en cuenta la fecha de entrega de la orden.

En las restricciones (6) se establece que, para todo período, la leche recibida de los tambos debe ser procesada en ese mismo período, sin importar si se produce para cumplir con una orden de un cliente.

El conjunto de restricciones (7) determina la cantidad de crema de leche disponible en cada periodo para la producción. La misma queda determinada a partir de la cantidad de leche recibida del tambo, menos la leche entera y descremada procesada en ese período, más la crema de leche recibida de otra fábrica.

La familia de restricciones (8), limita la producción de productos derivados de la crema de leche, con la cantidad disponible de la misma hasta ese período. Aquí se considera la crema de leche disponible hasta ese periodo porque la misma se puede almacenar, no tiene por qué producirse el mismo día que se generó.

La restricción (9) determina que, para el último período, toda la crema de leche disponible se debe procesar para realizar algún producto. Es decir, no puede haber producto en proceso.

Las restricciones (10) definen la cantidad de producto que no se pudo terminar para cada cliente (l_{pct}) en la fecha esperada.

La familia de restricciones (11) establece que, para antes de la fecha de entrega, la cantidad de productos faltantes para la producción de la orden de un cliente es 0.

El conjunto de restricciones (12) determina para cada período posterior a la fecha de entrega, la cantidad de producto faltante para completar la orden de un cliente. El mismo queda determinado a partir de lo que estaba pendiente hasta el período anterior menos lo que se produjo en el período analizado

La familia de restricciones (13) activa la variable binaria w_{prt} , estableciendo que si se procesa el producto p en la tarea r del período t , la variable binaria toma el valor 1. Mientras que la familia (14) indica que si tanto x_{prt} como y_{prt} son 0, entonces w_{prt} también.

El conjunto de restricciones (15) son de dominio.

5.3.1. Validación

Para realizar la validación de este modelo, se consideran conjuntos reducidos. Se define un conjunto de dos clientes que pueden solicitar cuatro productos distintos, dos pertenecientes al conjunto A y dos al conjunto B . Las tareas que deben ser realizadas para cada producto varían de dos a cuatro.

En las tablas que se mostrarán en cada caso de validación, cabe mencionar que si bien las variables x_{prt} dependen de cada tarea, se mostrará solo el de la última. Esto es debido a que se produce la misma cantidad del producto en cada tarea. A su vez, solo se muestran las variables que son distintas de 0 y los parámetros más influyentes de cada caso. También para las validaciones se considerará que el factor de conversión para la leche entera y descremada es de 0.8, al menos que se especifique lo contrario.

Por último, el parámetro Q_e tomará el valor de 1000 para toda tarea, al menos que se indique lo contrario.

Caso 1: Todos los pedidos de los clientes con fecha de entrega en el primer periodo.

Se analiza el caso en que todos los clientes solicitan sus órdenes con fecha de entrega en el primer periodo y la fábrica no tiene la capacidad de producirlo en esa fecha. Se espera que el modelo recomiende la producción a su máxima capacidad para el primer periodo y en los periodos inmediatos realice los pedidos pendientes.

Como se muestra a continuación, se puede observar que el comportamiento del modelo es según lo esperado. En primer lugar, produce todo lo necesario para cumplir con los clientes y recién en los últimos periodos produce el sobrante.

Tabla 5. Modelo de Planificación - Parámetros y Variables del caso de validación 1.

| PARÁMETROS | | | |
|------------------|------------------|---------|------------|
| DM_{pc} | Salto | Colonia | |
| Leche Entera | 1000 | 1000 | |
| Leche Descremada | 1000 | 1000 | |
| Manteca | 100 | 100 | |
| Crema Doble | 100 | 100 | |
| FE_{pc} | Salto | Colonia | |
| Leche Entera | 1 | 1 | |
| Leche Descremada | 1 | 1 | |
| Manteca | 1 | 1 | |
| Crema Doble | 1 | 1 | |
| VARIABLES | | | |
| Ciente | Producto | Período | x_{prtc} |
| Colonia | Crema Doble | 1 | 89 |
| Colonia | Crema Doble | 2 | 11 |
| Colonia | Leche Descremada | 2 | 200 |
| Colonia | Leche Descremada | 5 | 800 |
| Colonia | Leche Entera | 1 | 600 |
| Colonia | Leche Entera | 3 | 400 |
| Colonia | Manteca | 3 | 100 |
| Salto | Crema Doble | 1 | 100 |
| Salto | Leche Descremada | 1 | 200 |
| Salto | Leche Descremada | 4 | 800 |
| Salto | Leche Entera | 2 | 600 |
| Salto | Leche Entera | 3 | 400 |

| Producto | Período | y_{prt} |
|--------------|---------|-----------|
| Leche Entera | 6 | 800 |
| Leche Entera | 7 | 800 |
| Manteca | 4 | 29 |

| Ciente | Producto | Período | l_{pct} |
|---------|------------------|---------|-----------|
| Colonia | Crema Doble | 1 | 11 |
| Colonia | Leche Descremada | 1 | 1000 |
| Colonia | Leche Descremada | 2 | 800 |
| Colonia | Leche Descremada | 3 | 800 |
| Colonia | Leche Descremada | 4 | 800 |
| Colonia | Leche Entera | 1 | 400 |
| Colonia | Leche Entera | 2 | 400 |
| Colonia | Manteca | 1 | 100 |
| Colonia | Manteca | 2 | 100 |
| Salto | Leche Descremada | 1 | 800 |
| Salto | Leche Descremada | 2 | 800 |
| Salto | Leche Descremada | 3 | 800 |
| Salto | Leche Entera | 1 | 1000 |
| Salto | Leche Entera | 2 | 400 |
| Salto | Manteca | 1 | 100 |
| Salto | Manteca | 2 | 2 |

En la Tabla 5, se presentan los valores de los parámetros correspondientes a demanda por producto y cliente (DM_{pc}) y fecha de entrega solicitada por cada cliente, por producto (FE_{pc}). En cuanto a los valores de las variables obtenidas a través del modelo, se presenta la cantidad de unidades de producto producidas en cada período para cada uno de los clientes ($x_{prt c}$) así como los atrasos obtenidos, para cada producto/cliente, en cada uno de los períodos (l_{pct}) y la cantidad de producto elaborado para cumplir con el procesamiento del total de leche recibida en la semana (y_{prt}).

Al realizar esta validación surgió el inconveniente de que la función objetivo sólo sumaba los retrasos hasta la fecha límite, y no para los períodos siguientes. Como se busca minimizar los retrasos de todas las órdenes, es necesario considerar los mismos en todos periodos y no solo hasta la fecha de entrega. Por lo tanto, fue necesario agregar las siguientes restricciones, donde se define el retraso de cada orden para antes de la fecha de entrega y para después:

$$l_{pct} = 0, \quad \forall p \in P, c \in C, t \in T / t < FE_{pc}$$

$$l_{pct-1} - x_{prt c} = l_{pct}, \quad \forall p \in P, c \in C, t \in T / t > FE_{pc}$$

También se agregó en la función objetivo un término multiplicando al l_{pct} , para que tomen mayor valor los retrasos a medida que pasen los periodos:

$$\min \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} l_{pct} (t + 1 - FE_{pc})$$

Caso 2: Todos los pedidos de los clientes con fecha límite en el último periodo por lo que no hay retrasos.

En esta validación se busca analizar la situación en que todos los pedidos tengan fecha límite para el último día. Como el modelo de asignación se asegura de asignar pedidos hasta llegar a la capacidad máxima de la fábrica, en este caso no podría haber retrasos. Como no hay retrasos, el valor objetivo tendría que ser 0 y todos los pedidos se entregarán en fecha. A continuación, se puede observar el valor de los parámetros y variables para esta validación.

Tabla 6. Modelo de Planificación - Parámetros y Variables del Caso de Validación 2.

| PARÁMETROS | | | |
|------------------|------------------|---------|------------|
| DM_{pc} | Salto | Colonia | |
| Leche Entera | 1000 | 1000 | |
| Leche Descremada | 1000 | 1000 | |
| Manteca | 100 | 100 | |
| Crema Doble | 100 | 100 | |
| FE_{pc} | Salto | Colonia | |
| Leche Entera | 7 | 7 | |
| Leche Descremada | 7 | 7 | |
| Manteca | 7 | 7 | |
| Crema Doble | 7 | 7 | |
| VARIABLES | | | |
| Cliente | Producto | Período | x_{prtc} |
| Colonia | Crema Doble | 3 | 100 |
| Colonia | Leche Descremada | 2 | 600 |
| Colonia | Leche Descremada | 3 | 400 |
| Colonia | Leche Entera | 4 | 200 |
| Colonia | Leche Entera | 5 | 800 |
| Colonia | Manteca | 4 | 100 |
| Salto | Crema Doble | 3 | 100 |
| Salto | Leche Descremada | 3 | 400 |

| | | | |
|-------|------------------|---|-----|
| Salto | Leche Descremada | 4 | 600 |
| Salto | Leche Entera | 1 | 800 |
| Salto | Leche Entera | 2 | 200 |
| Salto | Manteca | 4 | 100 |

| Producto | Período | y_{prt} |
|--------------|---------|-----------|
| Leche Entera | 6 | 800 |
| Leche Entera | 7 | 800 |
| Manteca | 4 | 29 |

En la Tabla 6, se presentan los valores de los parámetros correspondientes a: demanda, por producto, de cada cliente (DM_{pc}) y fecha de entrega, por producto, solicitada por cada cliente (FE_{pc}). En cuanto a los valores de las variables obtenidas a través del modelo, se presenta: la cantidad de unidades de producto producidas en cada período para cada uno de los clientes ($x_{prt c}$) y la cantidad de producto elaborado para cumplir con el procesamiento del total de leche recibida en la semana (y_{prt}).

Caso 3: Los tiempos de *setup* considerados impiden descremar dos productos distintos en el día.

El objetivo de esta validación es analizar el impacto del tiempo de *setup* en la planificación de la producción. Se considera el valor del parámetro de la demanda y el tiempo de *setup*, tal que la fábrica no tenga la capacidad para producir los dos pedidos para el primer periodo. Si no hubiera tiempo de *setup*, los pedidos se podrían realizar para el periodo considerado. El valor de las variables es tal como se esperaba, un pedido se sugiere realizar en el primer periodo y el otro pedido en el segundo periodo.

Tabla 7. Modelo de Planificación - Parámetros y Variables del caso de validación 3.

| PARÁMETROS | | | |
|------------------|--------------|------------------|-------------|
| DM_{pc} | | Salto | |
| Leche Entera | | 400 | |
| Leche Descremada | | 400 | |
| FE_{pc} | | Salto | |
| Leche Entera | | 1 | |
| Leche Descremada | | 1 | |
| TSU_{ep} | Leche Entera | Leche Descremada | |
| Descremado | 50 | 50 | |
| VARIABLES | | | |
| Cliente | Producto | Período | $x_{prt c}$ |

| | | | |
|-------|------------------|---|-----|
| Salto | Leche Descremada | 2 | 400 |
| Salto | Leche Entera | 2 | 400 |

| Producto | Período | y_{prt} |
|------------------|---------|-----------|
| Leche Descremada | 2 | 400 |
| Leche Descremada | 3 | 800 |
| Leche Descremada | 5 | 800 |
| Leche Descremada | 6 | 800 |
| Leche Entera | 1 | 400 |
| Leche Entera | 4 | 800 |
| Leche Entera | 7 | 800 |
| Manteca | 3 | 184 |

| Cliente | Producto | Período | l_{pct} |
|---------|------------------|---------|-----------|
| Salto | Leche Descremada | 1 | 400 |

En la Tabla 7, se presentan los valores de los parámetros correspondientes a: demanda, por producto, de cada cliente (DM_{pc}), fecha de entrega, por producto, solicitada por cada cliente (FE_{pc}) y el tiempo de *setup* de una tarea/producto particular en dos productos (TSU_{ep}). En cuanto a los valores de las variables obtenidas a través del modelo, se presenta: la cantidad de unidades de producto producidas en cada período para cada uno de los clientes ($x_{prt,c}$), la cantidad de producto elaborado para cumplir con el procesamiento del total de leche recibida en la semana (y_{prt}) y los atrasos obtenidos, para cada producto/cliente, en cada uno de los períodos (l_{pct}).

5.4. Validación - Integración de Modelos

Para culminar con la validación del sistema, se procedió con el análisis de la integración de ambos modelos, estudiando el comportamiento del modelo de planificación cuando se toma información del modelo de asignación.

En esta validación, primero se exigirá a las fábricas al máximo, según las capacidades de estas, la producción en los tambos y la demanda de los clientes. Una vez que tengamos el resultado del modelo de asignación, se analizará cuál es la tarea con menor capacidad ociosa y a qué fábrica pertenece. Se tomará la fábrica correspondiente, para validar que el modelo de planificación tenga una solución factible. En esta validación, se considera en el modelo de asignación un conjunto de cuatro fábricas, que realizarán órdenes para cuatro clientes de cuatro productos distintos. A su vez, habrá tres tambos que pueden enviar leche a las fábricas y todas estas pueden procesar al menos tres productos. Se considera que los parámetros de las distintas fábricas serán iguales. Los únicos parámetros que serán distintos entre las fábricas son las distancias, aunque se busca una distribución real, basándose en la distribución actual de los tambos y fábricas en Uruguay.

En la Tabla 8, se presentan los valores de los parámetros correspondientes a: cantidad de leche producida por cada tambo (L_m), factor de conversión de leche entera y leche

descremada ($ConvL_a$), factor de conversión de crema doble y manteca ($ConvC_b$), demanda, por producto, de cada cliente (DM_{pc}). En cuanto a los valores de las variables obtenidas a través del modelo, se presenta: la cantidad de unidades de producto producidas en cada período para cada uno de los clientes (x_{pcs}) y la cantidad de leche enviado por cada tambo a cada una de las fábricas (q_{ms}).

Tabla 8. Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación integral.

PARÁMETROS

| Tambos | L_m |
|--------|--------|
| T1 | 215000 |
| T2 | 200000 |
| T3 | 205000 |

| Productos | $ConvL_a$ |
|------------------|-----------|
| Leche Entera | 0,98 |
| Leche Descremada | 0,96 |

| Productos | $ConvC_b$ |
|-------------|-----------|
| Crema Doble | 1 |
| Manteca | 0,45 |

| DM_{pc} | C1 | C2 | C3 | C4 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|
| Leche Entera | 75000 | 75000 | 70775 | 70775 |
| Leche Descremada | 75000 | 75000 | 75000 | 75000 |
| Crema Doble | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Manteca | 1175 | 1175 | 1175 | 1175 |

VARIABLES

| Cliente | Producto | Fábrica | x_{pcs} |
|---------|------------------|---------|-----------|
| C1 | Crema Doble | F2 | 2000 |
| C1 | Leche Descremada | F1 | 75000 |
| C1 | Leche Entera | F1 | 75000 |
| C1 | Manteca | F1 | 1175 |
| C2 | Crema Doble | F3 | 2000 |
| C2 | Leche Descremada | F4 | 75000 |
| C2 | Leche Entera | F4 | 75000 |
| C2 | Manteca | F4 | 1175 |
| C3 | Crema Doble | F3 | 2000 |
| C3 | Leche Descremada | F3 | 75000 |
| C3 | Leche Entera | F3 | 70775 |
| C3 | Manteca | F1 | 1175 |
| C4 | Crema Doble | F2 | 2000 |
| C4 | Leche Descremada | F2 | 75000 |
| C4 | Leche Entera | F2 | 70775 |

| | | | |
|----|---------|----|------|
| C4 | Manteca | F4 | 1175 |
|----|---------|----|------|

| Tambo | Fábrica | q_{ms} |
|-------|---------|----------|
| T1 | F3 | 56824 |
| T1 | F4 | 158176 |
| T2 | F2 | 153157 |
| T2 | F3 | 46872,8 |
| T3 | F1 | 158070 |
| T3 | F3 | 46929,7 |

A continuación, en la Tabla 9 se puede observar las capacidades ociosas (en minutos) de las tareas en las distintas fábricas. Cabe destacar que algunas de estas tareas se encuentran exigidas al máximo, como se puede observar en el caso del pasteurizado. Para el modelo de planificación, se tomará una fábrica que no tenga capacidad ociosa en alguna de las tareas. Se puede concluir que la tarea más exigida es el pasteurizado, por lo que se debe tomar una fábrica que no tenga tiempo sobrante para este caso de asignación.

Tabla 9. Modelo de Asignación - Capacidades ociosas en minutos para las tareas luego de la asignación.

| Tarea | F1 | F2 | F3 | F4 |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| Batido | 2145,43 | 3360,00 | 3360,00 | 2162,00 |
| Descremado | 213,07 | 321,07 | 368,97 | 211,00 |
| Envasado Crema Doble | 3360,00 | 3038,93 | 3050,00 | 3360,00 |
| Envasado Leche | 213,07 | 321,07 | 368,97 | 211,00 |
| Envasado Manteca | 2145,43 | 3360,00 | 3360,00 | 2162,00 |
| Homogeneizado | 213,07 | 0,00 | 58,97 | 211,00 |
| Pasteurizado | 0,00 | 0,00 | 58,97 | 0,00 |

Para finalizar con la validación, se analizará el modelo de planificación en la fábrica 1. En la misma, se utilizarán los mismos conjuntos de clientes y productos que se utilizaron en el modelo de asignación. A su vez, la demanda que debe realizar la fábrica, así como la leche que recibe de los tambos, quedaron determinadas a partir del modelo de asignación.

En la Tabla 10, se presentan los valores de los parámetros correspondientes a: tiempo de fabricación por producto/tarea (MT_{pr}), demanda, por producto, de cada cliente (DM_{pc}), fecha de entrega, por producto, solicitada por cada cliente (FE_{pc}) y cantidad de leche elaborada por cada tambo (L_m). En cuanto a los valores de las variables obtenidas a través del modelo, se presenta: la cantidad de unidades de producto producidas en cada período para cada uno de los clientes (x_{ptc}) y la cantidad de producto elaborado para cumplir con el procesamiento del total de leche recibida en la semana (y_{pt}).

Como era de esperar, el modelo de planificación tuvo una solución factible para la demanda asignada.

Tabla 10. Modelo de Planificación - Parámetros y Variables del caso de validación Integración.

PARÁMETROS

| MT_{pr} | Leche Entera | Leche Descremada | Manteca | Crema Doble |
|----------------------|--------------|------------------|---------|-------------|
| Descremado | 0,2 | 0,2 | 0 | 0 |
| Homogeneizado | 0,2 | 0,2 | 0,06 | 0 |
| Pasteurizado | 0,2 | 0,2 | 0,06 | 0,06 |
| Batido | 0 | 0 | 0 | 0,48 |
| Envasado Leche | 0,2 | 0,2 | 0 | 0 |
| Envasado Crema Doble | 0 | 0 | 0,06 | 0 |
| Envasado Manteca | 0 | 0 | 0 | 0,48 |

| DM_{pc} | C1 | C2 | C3 | C4 |
|------------------|-------|----|------|----|
| Leche Entera | 75000 | 0 | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 75000 | 0 | 0 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 1175 | 0 | 1175 | 0 |

| FE_{pc} | C1 | C2 | C3 | C4 |
|------------------|----|----|----|----|
| Leche Entera | 2 | 7 | 7 | 7 |
| Leche Descremada | 5 | 7 | 7 | 7 |
| Manteca | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Crema Doble | 2 | 7 | 6 | 7 |

| L_m | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 22581 | 22581 | 22581 | 22581 | 22581 | 22581 | 22581 |

VARIABLES

| Producto | Cliente | Período | x_{pctr} |
|------------------|---------|---------|------------|
| Leche Descremada | C1 | 3 | 10012 |
| Leche Descremada | C1 | 5 | 21678 |
| Leche Descremada | C1 | 6 | 21678 |
| Leche Descremada | C1 | 7 | 21632 |
| Leche Entera | C1 | 1 | 22130 |
| Leche Entera | C1 | 2 | 22130 |
| Leche Entera | C1 | 3 | 11910 |
| Leche Entera | C1 | 4 | 18831 |
| Manteca | C1 | 1 | 290 |
| Manteca | C1 | 2 | 290 |

| | | | |
|---------|----|---|-----|
| Manteca | C1 | 3 | 193 |
| Manteca | C1 | 4 | 290 |
| Manteca | C1 | 5 | 112 |
| Manteca | C3 | 5 | 329 |
| Manteca | C3 | 6 | 441 |
| Manteca | C3 | 7 | 406 |

| Producto | Período | y_{pt} |
|------------------|---------|----------|
| Leche Descremada | 7 | 46 |
| Leche Entera | 4 | 3299 |
| Manteca | 7 | 34 |

Al llevar a cabo esta validación tuvimos el inconveniente que, al principio, el modelo de asignación les asignaba a las fábricas una cantidad de leche de tambos y productos de clientes, superior a su capacidad de procesamiento. Cuando se analizó esta situación, se llegó a la conclusión que el modelo de asignación no consideraba el procesamiento de la leche excedente, ni tampoco todos los tiempos de *setup* necesarios para realizar los productos. En el modelo de planificación, una fábrica debe procesar toda la leche que recibe del tambo, finalizando la producción de los productos del conjunto A . Por lo tanto, el tiempo disponible de las tareas que se necesitan para realizar los productos del conjunto B y que a su vez participan en los productos de A , es menor a la capacidad total de la tarea.

Para solucionar lo mencionado anteriormente se tuvieron que realizar algunas modificaciones. En primer lugar, se agregaron las siguientes variables, para que se considere los productos realizados con la leche excedente del tambo y establecer las fábricas donde se realizan los productos del conjunto B :

Variables

y_{ps} Cantidad de producto p excedente producido por la fábrica s .

o_{bk} 1 si el producto b es fabricado en la fábrica k ; 0 si no.

A su vez, se agregaron o modificaron algunas restricciones para que se tomara en cuenta los productos de la variable y_{ps} , a la hora de establecer los días necesarios para producir cierto producto. También se determinó que si una fábrica produce algún producto del conjunto B , la fábrica necesitará de todos los días disponibles para realizar la producción. Recordemos que la variable f_{bk} afecta principalmente en los tiempos de *setup* que se deben considerar. Por lo que, de esta forma nos aseguramos de que los productos del conjunto B se puedan producir en la fábrica. Las siguientes restricciones fueron las que sufrieron modificaciones:

Restricciones

$$f_{ak} \geq \left(y_{ak} + \sum_{c \in C} x_{cak} \right) Mdays_{ak}, \quad \forall a \in A, k \in K_a \quad (16)$$

$$f_{bk} = 7 \cdot o_{bk}, \quad \forall b \in B, k \in K_b \quad (18)$$

$$o_{bk} \cdot N_2 \geq y_{bk} + \sum_{c \in C} x_{cbk}, \quad \forall b \in B, k \in K_b \quad (19)$$

$$o_{bk} \leq y_{bk} + \sum_{c \in C} x_{cbk}, \quad \forall b \in B, k \in K_b \quad (20)$$

6. Caso de Estudio

El caso abordado para la realización del análisis numérico considera un conjunto de cinco fábricas. Como punto de partida, se supone una redefinición en los términos de colaboración actuales entre las distintas empresas mencionadas en la Sección 3.5, tal que resulte aplicable lo definido en el modelo de asignación de acuerdo con las consideraciones de *Cloud Manufacturing*.

El objetivo final, además del hecho de aplicar los conceptos definidos a lo largo del informe, es mostrar los beneficios obtenidos a partir de la implementación de la solución planteada.

Para la determinación inicial de la cantidad de proveedores de leche cruda a utilizar, se toman en consideración parámetros conocidos como cantidad de leche producida por día, por cada vaca (20 litros) y otros aproximados como cantidad de vacas por tambo (entre 150 y 200 cabezas de ganado).

A partir de estos y considerando la capacidad de procesamiento total del conjunto de fábricas, se determina la utilización de 30 tambos. Para determinar la ubicación de los tambos, se tomó en cuenta la distribución actual de los tambos en Uruguay, donde se puede observar que en el sur oeste del país es donde se centran la mayor cantidad de los tambos.

La producción semanal de cada uno de los tambos se obtiene de manera aleatoria, considerando una cota superior en función de la capacidad de procesamiento de la leche.

El conjunto de productos considerado contiene 4 productos de los cuales 2 se fabrican a partir de leche cruda (leche entera y leche descremada) y otros 2 se fabrican a partir de crema de leche (crema doble y manteca).

Los productos que se fabrican a partir de leche cruda se pueden realizar en cualquiera de las cinco fábricas. Por su parte, para los productos producidos a partir de la crema de leche hay 2 fábricas capaces de elaborar ambos, una capaz de producir únicamente manteca, otra únicamente crema doble y una última que no puede producir ninguno de los dos.

Por su parte, las capacidades de las fábricas para la producción de los distintos productos se determinan en base a los datos de la empresa Utarg. Se varió en un pequeño porcentaje la capacidad de dicha empresa, para determinar las capacidades del resto de las fábricas. A su vez, se asegura que el conjunto de fábricas pueda procesar la leche que producen los tambos.

De manera similar, para los tiempos de fabricación y tiempos de *setup* de cada una de las tareas para cada una de las fábricas, se toman los relevados en la fábrica Utarg, los cuales se varían en pequeños porcentajes para obtener así los tiempos en las demás. Se considera que cuanto más eficiente, más cara. En caso de que una fábrica cuente con más de un recurso/máquina para una tarea específica, el Q_{max} será multiplicado por esa cantidad de máquinas disponibles.

A su vez, se define un conjunto de 30 clientes distribuidos geográficamente a lo largo y ancho del país. Se toma un mínimo de un cliente por departamento con la intención de

contemplar los distintos escenarios posibles. La demanda de estos clientes se determina, tal como fue mencionado en las consideraciones del modelo, de manera tal que la leche cruda necesaria para la producción de la demanda total sea inferior a la cantidad de leche producida por los tambos.

Las distancias entre las ubicaciones tambo-fábrica, fábrica-fábrica y fábrica-cliente fueron extraídas de Google Maps y consideran las distancias por carretera (y no en línea recta).

Además, se considera una utilización mínima de las fábricas del 10% ($U = 0,1$) mientras que los parámetros correspondientes a los pesos ponderados toman el valor de 0.5. Por último, los valores de conversión y capacidad de camiones son los informados por la empresa.

Para el caso de estudio los modelos fueron codificados con AMPL y resueltos con CPLEX 12.10.0.0. Se utilizó una computadora con procesador Intel Core i5-6200U CPU 2.4GHz con 8GB de memoria RAM.

A continuación, se presentan los principales parámetros utilizados para la experimentación numérica, el resto pueden ser encontrados en el Anexo IV.

La Tabla 11 presenta que producto es capaz de producir cada fábrica. Como se visualiza, únicamente F1 y F2 son capaces de producir todos los productos, mientras que F5 únicamente es capaz de producir leche entera o descremada.

Tabla 11. Capacidad de Producción por Fábrica

| | K_p | | | | |
|-------------|-------|----|----|----|----|
| Leche E | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
| Leche D | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
| Crema Doble | F1 | F2 | F3 | - | - |
| Manteca | F1 | F2 | - | F4 | - |

Por su parte, la Tabla 12 muestra la ubicación geográfica de las fábricas, tambos y clientes de acuerdo con las consideraciones mencionadas en esta sección.

Tabla 12. Ubicación Fábricas, Tambos y Clientes

| Fábrica | Ubicación | Tambos | Ubicación | Cliente | Ubicación |
|---------|----------------|--------|-----------------|---------|----------------|
| F1 | Cerrillos | T1 | Tarariras | C1 | Montevideo |
| F2 | Paysandú | T2 | Cerro Chato | C2 | Montevideo |
| F3 | Sarandí del Yi | T3 | Ecilda Paullier | C3 | Montevideo |
| F4 | Juan Lacaze | T4 | Conchillas | C4 | Montevideo |
| F5 | Carmelo | T5 | Young | C5 | Montevideo |
| | | T6 | Quebracho | C6 | Montevideo |
| | | T7 | Guichón | C7 | Montevideo |
| | | T8 | San Gregorio | C8 | San Carlos |
| | | T9 | Cardona | C9 | Punta del Este |
| | | T10 | Nueva Helvecia | C10 | Maldonado |

| | | | |
|-----|-------------------|-----|--------------------|
| T11 | Tarariras | C11 | Piriápolis |
| T12 | Villa Serrana | C12 | Melo |
| T13 | Mariscal | C13 | Trinidad |
| T14 | Sarandí Grande | C14 | Minas |
| T15 | Lascano | C15 | Rocha |
| T16 | Sarandí del Yi | C16 | Treinta y Tres |
| T17 | Paso de los Toros | C17 | Rivera |
| T18 | Paso de Ceferino | C18 | Tacuarembó |
| T19 | Cerro Chato | C19 | Bella Unión |
| T20 | Aigua | C20 | Salto |
| T21 | Cebollati | C21 | Paysandú |
| T22 | Villa Sara | C22 | Mercedes |
| T23 | San Jacinto | C23 | San José |
| T24 | Mercedes | C24 | Ciudad de la Costa |
| T25 | Santa Catalina | C25 | Ciudad de la Costa |
| T26 | Minas | C26 | Canelones |
| T27 | San Gregorio | C27 | Colonia |
| T28 | José Enrique Rodo | C28 | Tala |
| T29 | Maciel | C29 | La Paloma |
| T30 | Castillos | C30 | Carmelo |

La Tabla 13 y la Tabla 14 representan los costos de fabricación por producto/fábrica y el tiempo máximo de tarea por producto/fábrica respectivamente.

Tabla 13. Costos de fabricación de productos por fábrica

| MC_{ps} | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|------------------|------|------|----|------|----|
| Leche Entera | 20,2 | 28 | 18 | 22,1 | 16 |
| Leche Descremada | 20,2 | 28 | 18 | 22,1 | 16 |
| Crema Doble | 62,1 | 77,5 | 50 | 0 | 0 |
| Manteca | 137 | 160 | 0 | 145 | 0 |

Tabla 14. Tiempo máximo de tarea por producto en cada fábrica

| $MTmax_{ps}$ | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|------------------|------|------|-------|-------|------|
| Leche Entera | 0,02 | 0,01 | 0,025 | 0,015 | 0,03 |
| Leche Descremada | 0,02 | 0,01 | 0,025 | 0,015 | 0,03 |
| Crema Doble | 0,07 | 0,05 | 0,075 | 0 | 0 |
| Manteca | 0,48 | 0,35 | 0 | 0,4 | 0 |

6.1. Análisis de resultados

Con los parámetros mencionados al inicio de la Sección 6, se encontró una solución óptima en el primero de los modelos matemáticos, el modelo de asignación. En la Figura 9, se puede observar gráficamente la ubicación de los tambos y clientes que se le asignan a la fábrica 1 (F1) en la solución óptima del modelo mencionado.

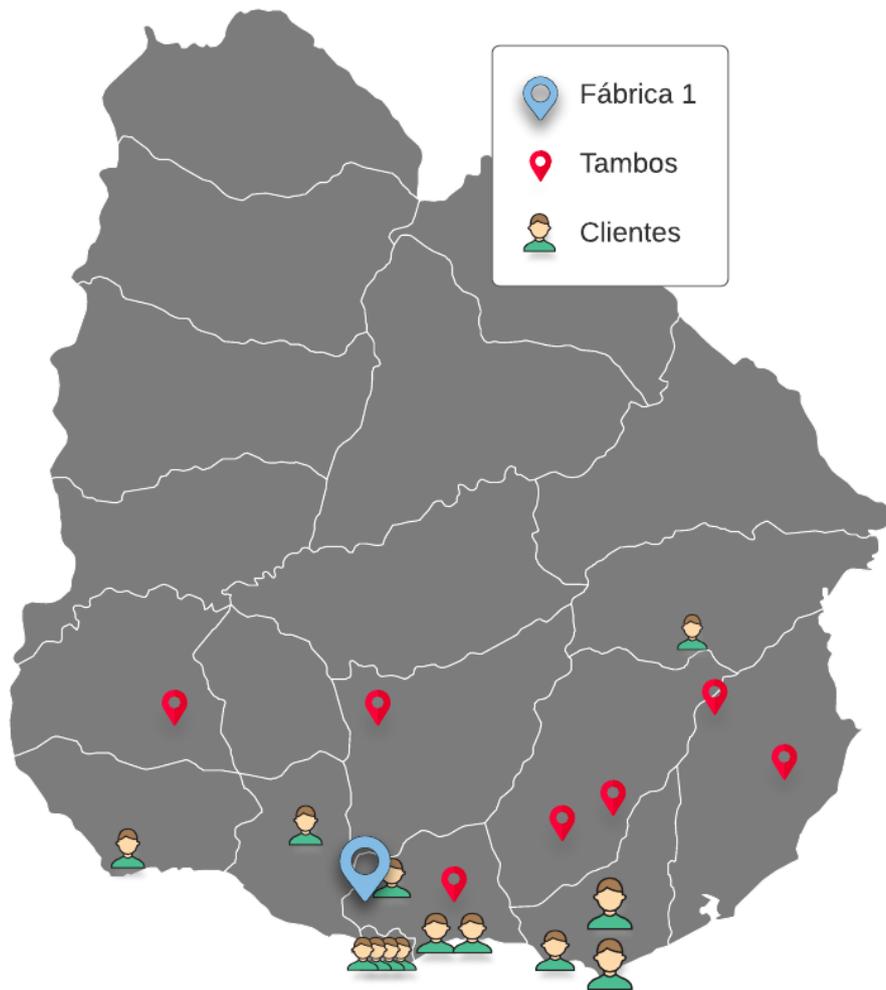


Figura 9. Mapa de Asignación de órdenes de clientes y tambos a la fábrica 1.

Por su parte, se puede apreciar que la fábrica que no tiene la capacidad de producir subproductos de crema de leche (F5) envía la misma a otra de las fábricas (F4). A su vez, esta fábrica que puede procesar manteca pero no crema doble, puede cumplir con la demanda asignada a partir de la crema de leche que obtiene del descremado de la leche. La crema de leche excedente la envía, junto con la que recibe de F5, a una tercera fábrica (F1) para así poder procesar la totalidad de crema de leche obtenida del proceso de descremado. Sin este envío de crema de leche, esta última fábrica no hubiese podido cumplir con las órdenes asignadas de manteca y crema doble, por lo que precisa recibir crema de leche de otras fábricas. Los envíos de crema de leche (e_{sk}) se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Traslados de crema de leche entre fábricas

| Fábrica (s) | Fábrica (k) | e_{sk} |
|-------------|-------------|----------|
| F1 | F2 | 0 |
| F1 | F3 | 0 |
| F1 | F4 | 0 |
| F1 | F5 | 0 |

| | | |
|----|----|---------|
| F2 | F1 | 0 |
| F2 | F3 | 0 |
| F2 | F4 | 0 |
| F2 | F5 | 0 |
| F3 | F1 | 0 |
| F3 | F2 | 0 |
| F3 | F4 | 0 |
| F3 | F5 | 0 |
| F4 | F1 | 8064,63 |
| F4 | F2 | 0 |
| F4 | F3 | 0 |
| F4 | F5 | 0 |
| F5 | F1 | 0 |
| F5 | F2 | 0 |
| F5 | F3 | 0 |
| F5 | F4 | 2849,8 |

Poder compartir los recursos entre las fábricas para una producción más eficiente, es un aspecto al que se destaca en el paradigma de fabricación *Cloud Manufacturing*.

A su vez, en la Tabla 16 se puede observar que ninguna fábrica requiere de todos los días disponibles de fabricación para procesar algunos de los productos derivados de la leche cruda (leche entera o leche descremada). Este resultado, representado en la variable f , nos indica que ninguno de los productos requiere de más de siete días de fabricación. Esto es necesario ya que, en caso contrario, las fábricas no podrían cumplir con las órdenes asignadas.

Tabla 16. Días necesarios para la fabricación de cada producto por fábrica.

| Producto (p) | Fábrica (s) | f_{ps} |
|------------------|-------------|----------|
| Crema Doble | F1 | 7 |
| Crema Doble | F2 | 7 |
| Crema Doble | F3 | 7 |
| Leche Descremada | F1 | 5 |
| Leche Descremada | F2 | 3 |
| Leche Descremada | F3 | 3 |
| Leche Descremada | F4 | 3 |
| Leche Descremada | F5 | 4 |
| Leche Entera | F1 | 2 |
| Leche Entera | F2 | 2 |
| Leche Entera | F3 | 4 |
| Leche Entera | F4 | 4 |
| Leche Entera | F5 | 3 |
| Manteca | F1 | 7 |
| Manteca | F2 | 7 |
| Manteca | F4 | 7 |

Por su parte, se puede apreciar que la mayoría de la leche excedente de los tambos, es decir, aquella que no es utilizada para la producción de productos solicitados por los clientes, es procesada por una de las fábricas en particular (la fábrica 2). Si consideramos únicamente la leche excedente, la fábrica 2 procesa más del 90%, mientras que no es la más exigida en la asignación de productos. Cabe destacar que la producción para cumplir con la demanda es la que se intenta optimizar, no así la producción de los excedentes.

Otro de los puntos interesantes para remarcar y analizar es lo que sucede con el envío de leche de los tambos a las fábricas, en los cuales se aprecia diferentes comportamientos (Tabla 17). Algunos de estos envían toda la producción a una única fábrica (T18 a F2) y otros dividen entre varias fábricas (T14 a F1 y F4). Esto es algo importante en este problema, que las fábricas puedan recibir leche de distintos tambos y no dependan de alguno en particular. De esta forma, la distribución de leche puede realizarse de forma más eficiente.

Tabla 17. Asignación de la leche de los tambos.

| q_{ms} | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|----------|---------|-------|-------|---------|-------|
| T1 | 0 | 0 | 0 | 23713 | 0 |
| T2 | 0 | 0 | 29888 | 0 | 0 |
| T3 | 0 | 0 | 0 | 13627 | |
| T4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24203 |
| T5 | 0 | 21634 | 0 | 0 | 0 |
| T6 | 0 | 28236 | 0 | 0 | 0 |
| T7 | 0 | 27622 | 0 | 0 | 0 |
| T8 | 0 | 0 | 0 | 22048 | 0 |
| T9 | 0 | 0 | 0 | 22621 | 0 |
| T10 | 0 | 0 | 0 | 20662 | 0 |
| T11 | 0 | 0 | 0 | 23138 | 0 |
| T12 | 27715 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| T13 | 0 | 0 | 4687 | 25000 | 0 |
| T14 | 11876,8 | 0 | 0 | 18041,2 | 0 |
| T15 | 25000 | 0 | 4741 | 0 | 0 |
| T16 | 0 | 0 | 29602 | 0 | 0 |
| T17 | 0 | 22046 | 0 | 0 | 0 |
| T18 | 0 | 26339 | 0 | 0 | 0 |
| T19 | 0 | 22546 | 0 | 0 | 0 |
| T20 | 0 | 0 | 0 | 23049 | 0 |
| T21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22210 |
| T22 | 0 | 0 | 27038 | 0 | 0 |
| T23 | 24136 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| T24 | 0 | 21925 | 0 | 0 | 0 |
| T25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20444 |
| T26 | 23980 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| T27 | 0 | 21251 | 0 | 0 | 0 |
| T28 | 22207 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|-----|-------|--------|------|---|---------|
| T29 | 0 | 1692,1 | 0 | 0 | 24701,9 |
| T30 | 20685 | 0 | 8285 | 0 | 0 |

Para decidir en qué fábrica aplicar el modelo de planificación, se tomará en cuenta la utilización de las tareas en las fábricas. A partir de los valores de las variables del modelo de asignación, se puede apreciar las exigencias que tienen las tareas en las distintas fábricas. Se escogerá una de las fábricas más exigidas con sus respectivos parámetros para realizar la planificación de tareas en ella. La Tabla 18 representa la capacidad ociosa (en minutos) de las diferentes tareas en las fábricas, donde se puede observar que las fábricas 1, 3 y 4 tienen tareas muy comprometidas (Envasado Leche, Homogeneizado/Pasteurizado y Pasteurizado respectivamente).

Tabla 18: Capacidad ociosa de las tareas para las distintas fábricas en el caso de estudio.

| Capacidad Ociosa (minutos) | | | | | |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Tareas | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
| Batido | 1112,57 | 2521,40 | 3360,00 | 3140,80 | 3360,00 |
| Descremado | 3469,96 | 1379,82 | 505,68 | 236,33 | 383,73 |
| Envasado Crema Doble | 2732,32 | 2953,30 | 2782,59 | 3360,00 | 3360,00 |
| Envasado Leche | 4,96 | 1304,82 | 713,58 | 131,33 | 278,73 |
| Envasado Manteca | 1392,57 | 2731,40 | 3360,00 | 3210,80 | 3360,00 |
| Homogeneizado | 2901,00 | 1103,46 | 3,66 | 236,33 | 383,73 |
| Pasteurizado | 2039,34 | 786,41 | 3,66 | 0,00 | 383,73 |

Debido a que los datos utilizados como referencia corresponden a la fábrica 1, se decide utilizar estos valores (parámetros y resultados de las variables) como parámetros del modelo de planificación.

En la Tabla 19 se presentan los valores que tomó la variable $x_{c,p,F1}$ a través del modelo de asignación. Estos corresponden a la cantidad fabricada de cada producto, para cada cliente, en la fábrica F1.

Tabla 19: Órdenes asignadas a la fábrica 1.

| $x_{c,p,F1}$ | Leche Entera | Leche Descremada | Crema Doble | Manteca |
|--------------|--------------|------------------|-------------|---------|
| C1 | 10679 | 14112 | 316 | 166 |
| C2 | 0 | 11449 | 324 | 123 |
| C3 | 11404 | 0 | 324 | 281 |
| C4 | 0 | 11085 | 299 | 0 |
| C5 | 0 | 0 | 306 | 0 |
| C6 | 0 | 13320 | 309 | 135 |
| C7 | 0 | 11902 | 286 | 154 |
| C8 | 0 | 12681 | 322 | 155 |
| C9 | 10289 | 0 | 304 | 178 |
| C10 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | |
|-----|-------|-------|-----|-----|
| C11 | 0 | 0 | 302 | 192 |
| C12 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C13 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C16 | 10563 | 0 | 0 | 298 |
| C17 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C19 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C20 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C21 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C22 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C23 | 0 | 0 | 310 | 0 |
| C24 | 0 | 10287 | 302 | 141 |
| C25 | 0 | 11620 | 327 | 190 |
| C26 | 0 | 0 | 313 | 271 |
| C27 | 0 | 0 | 284 | 183 |
| C28 | 0 | 10861 | 0 | 108 |
| C29 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C30 | 0 | 0 | 0 | 0 |

En el caso del modelo de planificación, cabe destacar que la demanda de los clientes tiene una fecha de entrega solicitada (Tabla 20), algo que no se contemplaba en el modelo de asignación. Es decir, a la demanda que se le asignó a la fábrica, se le agrega la fecha de entrega que desea el cliente. Sin embargo, como se menciona en la Sección 4.3, el conjunto de fábricas se compromete a la entrega de los productos en el día siete, el último período.

De todos modos, el modelo planteado tiene como objetivo minimizar los retrasos con respecto a las fechas solicitadas por los clientes. En caso de que el cliente no haya solicitado alguno de los productos, el valor ingresado para dicho parámetro será 7. Los valores que se observa en la Tabla 20 fueron determinados de forma aleatoria.

Tabla 20: Fecha de Entrega de las órdenes realizadas por los distintos clientes.

| FE_{cp} | Leche Entera | Leche Descremada | Crema Doble | Manteca |
|-----------|--------------|------------------|-------------|---------|
| C1 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| C2 | 7 | 2 | 3 | 3 |
| C3 | 4 | 7 | 2 | 4 |
| C4 | 7 | 4 | 5 | 5 |
| C5 | 7 | 7 | 6 | 7 |
| C6 | 7 | 3 | 3 | 3 |
| C7 | 7 | 2 | 5 | 5 |
| C8 | 1 | 7 | 5 | 5 |
| C9 | 5 | 7 | 3 | 3 |
| C10 | 6 | 7 | 7 | 7 |

| | | | | |
|-----|---|---|---|---|
| C11 | 7 | 7 | 4 | 4 |
| C12 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C13 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C14 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C15 | 7 | 2 | 6 | 2 |
| C16 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C17 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C18 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C19 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C20 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C21 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C22 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C23 | 7 | 7 | 5 | 7 |
| C24 | 7 | 5 | 4 | 4 |
| C25 | 7 | 3 | 3 | 3 |
| C26 | 7 | 7 | 3 | 3 |
| C27 | 7 | 7 | 5 | 5 |
| C28 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C29 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| C30 | 7 | 7 | 6 | 6 |

De acuerdo con los valores que toman las variables a través del modelo de planificación, se puede apreciar que de los 17 clientes para los que produce la fábrica 1, sólo hay tres que tienen atraso en sus pedidos y en todos los casos es para el producto de leche descremada. En la Tabla 21 se presenta la cantidad de producto atrasado. En los tres casos, la cantidad atrasada corresponde a un único pedido.

Tabla 21: Cantidad de producto atrasado al final de cada período (día)

| l_{pt*} | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------|---|---|------|------|------|---|---|
| Leche E | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leche D | 0 | 0 | 8845 | 9761 | 8787 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Analizando la holgura de las distintas tareas, se puede observar que la producción de leche se encuentra al máximo de su capacidad durante todos los períodos. A su vez, la tarea con menos holgura es la de envasado de leche, por lo que se podría presumir que la misma es un cuello de botella en el proceso de producción de esta fábrica (dichos resultados son presentados en la Tabla 22).

Tabla 22: Capacidad Ociosa por tarea/periodo

| Capacidad Ociosa / Tarea (min) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Descremado | 519 | 558 | 558 | 519 | 519 | 519 | 523 |
| Homogenizado | 395 | 478 | 502 | 398 | 422 | 462 | 416 |
| Pasteurizado | 321 | 349 | 390 | 273 | 335 | 395 | 222 |
| Batido | 370 | 201 | 254 | 212 | 328 | 390 | 0 |
| Envasado Leche | 9 | 63 | 63 | 9 | 9 | 9 | 13 |
| Envasado Crema Doble | 414 | 452 | 471 | 417 | 437 | 472 | 428 |
| Envasado Manteca | 410 | 241 | 294 | 252 | 368 | 430 | 40 |

Cabe destacar que las restricciones del modelo hacen que toda la leche que recibe del tambo sea procesada a lo largo de la semana, para producir leche entera o leche descremada, independientemente que sea para cumplir con el pedido de algún cliente.

Por otro lado, se puede observar que la fábrica no procesa el excedente de leche hasta el último día. Es decir, primero realiza los productos solicitados por los clientes y luego procesa el excedente de leche cruda y crema de leche recibida (Tabla 23).

Tabla 23: Cantidades de producto elaborados en cada periodo

| Producto | Tarea | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | |
|------------------|----------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| | | x_{ptr*} | y_{ptr} |
| Leche Entera | Descremado | 10679 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11404 | 0 | 10289 | 0 | 10563 | 0 | 0 | 3 |
| | Homogeneizado | 10679 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11404 | 0 | 10289 | 0 | 10563 | 0 | 0 | 3 |
| | Pasteurizado | 10679 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11404 | 0 | 10289 | 0 | 10563 | 0 | 0 | 3 |
| | Envasado Leche | 10679 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11404 | 0 | 10289 | 0 | 10563 | 0 | 0 | 3 |
| Leche Descremada | Descremado | 10879 | 0 | 21340 | 0 | 21340 | 0 | 10169 | 0 | 11261 | 0 | 10992 | 0 | 21337 | 0 |
| | Homogeneizado | 10879 | 0 | 21340 | 0 | 21340 | 0 | 10169 | 0 | 11261 | 0 | 10992 | 0 | 21337 | 0 |
| | Pasteurizado | 10879 | 0 | 21340 | 0 | 21340 | 0 | 10169 | 0 | 11261 | 0 | 10992 | 0 | 21337 | 0 |
| | Envasado Leche | 10879 | 0 | 21340 | 0 | 21340 | 0 | 10169 | 0 | 11261 | 0 | 10992 | 0 | 21337 | 0 |
| Crema Doble | Homogeneizado | 1268 | 0 | 640 | 0 | 309 | 0 | 1225 | 0 | 880 | 0 | 306 | 0 | 0 | 1034 |
| | Pasteurizado | 1268 | 0 | 640 | 0 | 309 | 0 | 1225 | 0 | 880 | 0 | 306 | 0 | 0 | 1034 |
| | Envasado Crema Doble | 1268 | 0 | 640 | 0 | 309 | 0 | 1225 | 0 | 880 | 0 | 306 | 0 | 0 | 1034 |
| Manteca | Pasteurizado | 250 | 0 | 602 | 0 | 492 | 0 | 579 | 0 | 337 | 0 | 207 | 0 | 108 | 913 |
| | Batido | 250 | 0 | 602 | 0 | 492 | 0 | 579 | 0 | 337 | 0 | 207 | 0 | 108 | 913 |
| | Envasado Manteca | 250 | 0 | 602 | 0 | 492 | 0 | 579 | 0 | 337 | 0 | 207 | 0 | 108 | 913 |

6.2. Análisis de sensibilidad

Una vez obtenidos los resultados del caso de estudio, es de interés realizar un análisis de sensibilidad. La intención de este análisis es observar el comportamiento del modelo ante la variación de ciertos parámetros que afectan al resultado de este, manteniendo el mismo modelo explicado al comienzo de la Sección 6. En primer lugar, se

determinaron los parámetros sensibles a estudiar, para luego modificar los valores de los mismos y obtener los resultados del modelo.

Como se explica en la Sección 5, en el modelo de asignación se tiene como objetivo minimizar los tiempos y costos involucrados en el problema. A su vez, se cuenta con una ponderación relativa tanto para los costos como para el tiempo, determinándose, para el caso de estudio, que las mismas fueran iguales y con un valor de 0,5. Sin embargo, en la realidad puede suceder que se quiera brindar una importancia mayor a algunos de los objetivos, dependiendo en qué situación se esté. Es por esto que se analizará los resultados al modificar estas ponderaciones, dándole mayor peso a algún objetivo en particular.

Por otro lado, en el modelo de asignación se cuenta con un parámetro que permite asegurar un mínimo de utilización del tiempo total de cada una de las fábricas. El mismo se utiliza para prevenir posibles situaciones en las que una fábrica pudiera no recibir orden alguna para fabricar, ya que en la realidad dificultaría el éxito de la implementación de Cloud Manufacturing. Aumentando el valor ingresado para dicho parámetro, se pudo analizar la solución del sistema verificando a partir de qué valor se modifica la misma.

Por su parte, tomando en cuenta que los costos y tiempos de producción pueden variar por diferentes factores, es relevante realizar el estudio del impacto que tiene una modificación de estos en el modelo. Por tal motivo se modificarán estos parámetros para ver el comportamiento en el resultado del modelo.

Por último, se tiene la intención de analizar el beneficio de realizar una asignación integral de las fábricas en lugar de considerarlas de forma independiente. Para esto, se estudió el caso en que no existiese un modelo de asignación y que cada fábrica deba afrontar una demanda particular, para luego sí comparar con el resultado obtenido del modelo de asignación.

A continuación, se describen cada uno de los casos explicados anteriormente, con los resultados obtenidos del modelo.

6.2.1. Variación en los pesos ponderados de costo y tiempo

De forma de explorar el efecto que tiene la variación de los pesos ponderados de costo y tiempo (W_c, W_t) en la solución óptima del modelo, se alteraron los parámetros haciéndolos variar entre 0 y 1. Se entiende que al variar W_c también lo hace W_t , ya que en todo momento se cumple la siguiente igualdad $W_c + W_t = 1$.

Partiendo del caso de base, al incrementar W_c , la componente del costo en la función objetivo disminuye un máximo de un 2,05%, mientras que la componente del tiempo en la función objetivo aumenta hasta un máximo de 5,82%. Esta comparación es realizada respecto al caso de estudio en el que tanto W_c como W_t tienen un valor de 0,5.

Por su parte, al disminuir el parámetro W_c hasta 0, se observa en el costo un aumento máximo de 3,99% y que el tiempo disminuye un 3,25% respecto del valor obtenido en el caso de estudio.

En la Tabla 24 se presentan los resultados para ambas variables, en función de los valores asignados a los pesos ponderados de tiempo y costo. Además, se aprecia la variación de estas variables con respecto al caso de estudio.

Tabla 24. Análisis de Sensibilidad - Variación en los pesos ponderados de tiempo y costo.

| W_t | W_c | Tiempo (min) | Costo (mill. U\$) | OF | %Variación Tiempo | %Variación costo |
|------------|------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|------------------|
| 1 | 0 | 31.386 | 17,09 | 0 | -3,25% | 3,99% |
| 0,8 | 0,2 | 31.426 | 16,93 | 0,17925 | -3,13% | 3,03% |
| 0,6 | 0,4 | 32.110 | 16,56 | 0,3347 | -1,02% | 0,78% |
| 0,5 | 0,5 | 32.441 | 16,44 | 0,3486 | 0,00% | 0,00% |
| 0,4 | 0,6 | 32.988 | 16,26 | 0,3130 | 1,69% | -1,09% |
| 0,2 | 0,8 | 33.924 | 16,11 | 0,1777 | 4,57% | -2,01% |
| 0 | 1 | 34.328 | 16,10 | 0 | 5,82% | -2,05% |

Como se puede observar en la Figura 10, a medida que se aumenta el peso ponderado del costo W_c , disminuyen la función objetivo del costo al mismo tiempo que aumenta la del tiempo. De esto se desprende que, para el sistema de asignación, los objetivos de costo y tiempo son contrapuestos.

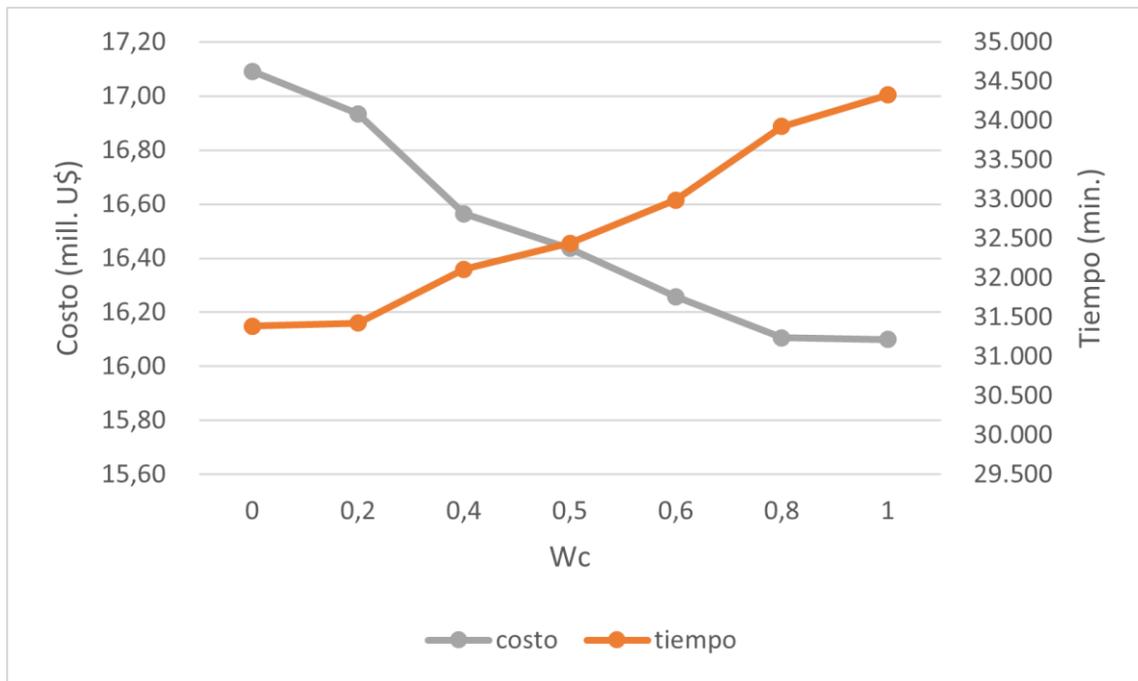


Figura 10. Efecto de la variación de los parámetros W_c y W_t en la función objetivo.

El valor que adopta la variable tiempo a través del modelo de asignación (Figura 10), considera tanto la sumatoria de los tiempos de fabricación de los distintos productos como la de los tiempos de traslado tambos-fábricas, fábrica-fábrica, fábricas-clientes.

Los resultados obtenidos muestran que la variación máxima de la variable tiempo es de 9,37% pasando de un tiempo mínimo de 31386 min (con $W_t = 1$) a un tiempo máximo de 34328 (con $W_t = 0$).

Por su parte, la variable costo presenta una variación máxima del 6,15% pasando de un costo mínimo de 16,10 millones (con $W_c = 1$) a un costo máximo de 17,09 millones (con $W_c = 0$).

6.2.2. Variación en la asignación de órdenes mínimas de las fábricas

El mínimo de asignación de producción en cada fábrica es un tema que resulta interesante analizar ya que la intención del sistema es enfocarse en las eficiencias globales y no en las empresas particulares. Tomando en cuenta esto, exigir un mínimo de asignación por fábrica podría no ser lo óptimo en términos de costo y tiempo. Sin embargo, que alguna fábrica no tenga demanda asignada podría traer dificultades en la gestión interna de cada fábrica. Es por esto que se define una asignación mínima de órdenes de clientes a cada fábrica, la cual podría estar definida en una política de la plataforma de *Cloud Manufacturing*. Por este motivo, se incluyen las restricciones (15) explicadas en la Sección 4.3. En el presente análisis se varía el parámetro U , correspondiente al porcentaje de utilización mínimo.

En el caso de estudio, la utilización mínima se fija como el 10% de la capacidad de la tarea con menor tiempo disponible para fabricación. Debido a la demanda considerada para el caso, las fábricas deben trabajar en un porcentaje alto de capacidad. Esto genera que para cualquier valor de U menor a 70%, los costos y tiempos de la función objetivo no se vean afectados.

Para valores superiores a dicho porcentaje, se presentan, en la Tabla 25, las variaciones en los valores obtenidos para las variables a través del modelo.

Tabla 25: Análisis de Sensibilidad - Variación en porcentaje mínimo de asignación de producción.

| U | Costo (U\$) | Tiempo (min) | %Variación costo | %Variación tiempo |
|------|-------------|--------------|------------------|-------------------|
| 0,1 | 16.436.000 | 32.441 | - | - |
| 0,7 | 16.624.500 | 32.342 | 1,15% | -0,30% |
| 0,8 | 16.657.800 | 32.973 | 1,35% | 1,64% |
| 0,85 | 16.829.800 | 33.466 | 2,40% | 3,16% |
| 0,9 | No factible | No factible | - | - |

Como es de esperar, al aumentar la asignación mínima de órdenes, aumenta el valor de la solución óptima. El costo aumenta un máximo de 2,4%, mientras que el tiempo un 3,16%. Teniendo en cuenta los parámetros de demanda y capacidad del caso de estudio, al exigir que las fábricas trabajen a un 90% de su capacidad, el modelo no tiene una solución factible ya que las demandas de los clientes no son lo suficientemente altas.

Considerando lo mencionado en la presente sección, el parámetro U que se define en la política de la plataforma, dependerá de la demanda semanal de los clientes. Por otro lado, se observa que un cambio en este parámetro no tiene mayor incidencia en los costos y tiempos de la función objetivo.

6.2.3. Variación en los Tiempos de Producción

En el presente análisis se plantea una situación en la cual se pretende adquirir máquinas en los posibles cuellos de botella de las distintas fábricas, para poder reducir los tiempos de producción y aumentar la capacidad del sistema. De forma particular se analizó la capacidad ociosa de la solución del caso de estudio, lo cual se puede observar en la

Tabla 11, y en base a esto se decide incorporar las siguientes máquinas al sistema de fábricas:

1. Máquina de Envasado de Leche en F1
2. Pasteurizadora y Homogeneizadora en F3
3. Pasteurizadora en F4

Para el presente estudio, y a partir de estimaciones realizadas por Utarg suponiendo la adquisición de nueva maquinaria, se modifican los tiempos de producción de las tareas mencionadas, disminuyéndolos un porcentaje $\beta \in \{10\%, 20\%, 30\%\}$.

Se pretende investigar la variación de los costos y tiempos en la solución óptima, al adquirir una maquinaria con menores tiempos de fabricación en los cuellos de botella del sistema integrado por las 5 fábricas. En la Figura 11 se puede observar cómo al disminuir los tiempos de producción en las tareas mencionadas, se tiene un mayor impacto en el costo de la solución óptima.

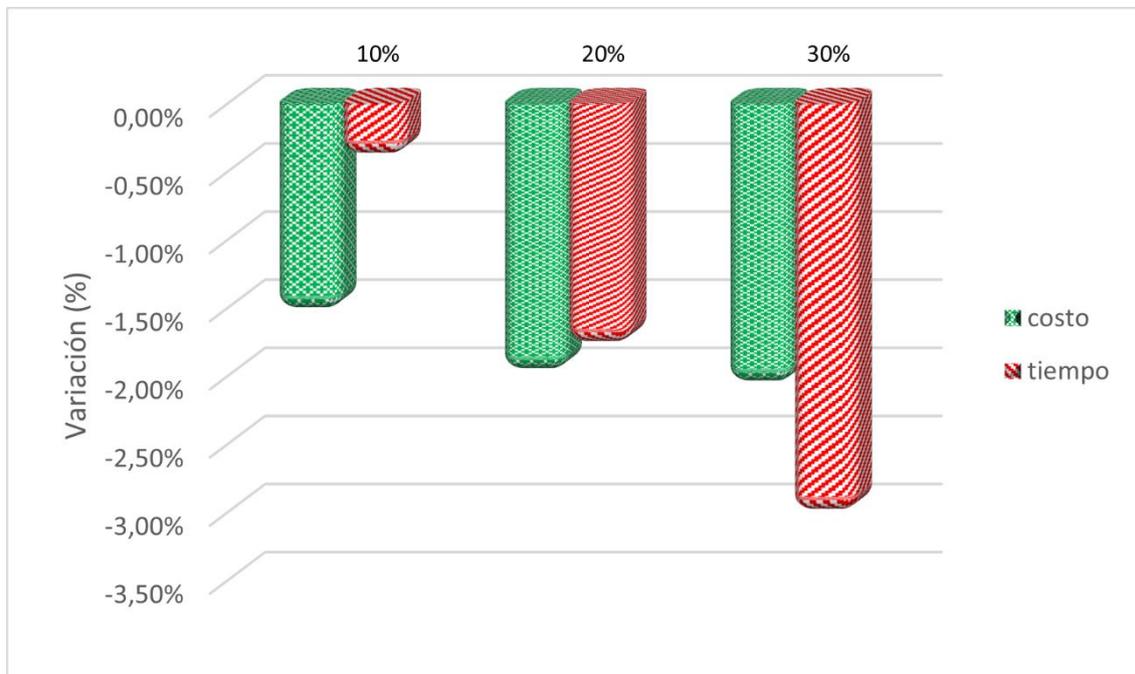


Figura 11: Efectos de la variación de los parámetros MT_{psr} en los cuellos de botella del sistema.

Los mayores beneficios se dan cuando los parámetros MT_{psr} de los cuellos de botella disminuyen un 30%, obteniendo una mejora del 2,07% en los costos totales y un 3,00% en los tiempos totales de la solución óptima. A su vez, si se compara el costo de la solución óptima cuando β es 10 y 20%, la mejora que se obtiene en el costo es únicamente del 0,09%.

6.2.4. Variación de la Demanda Media

En este caso, se hace variar la demanda media de los productos solicitados por los clientes para analizar el comportamiento de la solución óptima obtenida al resolver el modelo de asignación. De esta forma, se puede evaluar cuánto puede aumentar la demanda hasta que el sistema de fábricas considerado no pueda satisfacerla y ver el comportamiento de los costos y tiempos de la solución óptima.

Para variar la demanda, se calculó la demanda media de cada producto en el caso de estudio. Luego se varió este valor en función de $\beta \in \{-10\%, -5\%, 5\%, 10\%\}$ para así determinar las nuevas demandas medias en cada uno de los casos. Finalmente, para asignar el nuevo valor de demanda de cada producto/cliente, se aplicó una distribución normal con la nueva media y una desviación estándar igual a la media dividido tres.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 26 y en la Figura 12, donde se puede observar la variación de las funciones objetivo de costo y tiempo en la solución óptima, con respecto al caso de aplicación.

Las columnas de Tiempo y Costo contienen los valores de las respectivas funciones objetivo en la solución óptima obtenida. Del análisis se obtiene que, si la demanda media de cada producto aumenta un 10%, las fábricas no tendrán la capacidad suficiente para afrontar este aumento. Esto resulta de gran utilidad si se pretende incorporar nuevos clientes, se debe considerar que la capacidad de las fábricas no podrá soportar un aumento mayor o igual al 10%.

Tabla 26. Análisis de Sensibilidad - Variación de la demanda media

| β | Costo | Tiempo | %Variación Costo | %Variación Tiempo |
|---------|-------------|-------------|------------------|-------------------|
| -10% | 14.988.200 | 31.464 | -8,81% | -3,01% |
| -5% | 15.613.300 | 33.758 | -5,01% | 4,06% |
| 0% | 16.436.000 | 32.441 | - | - |
| 5% | 17.342.700 | 35.200 | 5,52% | 8,51% |
| 10% | No Factible | No Factible | - | - |

En la Figura 12 se observa que al disminuir la demanda un 10% se tiene una disminución en los costos del 8,81% respecto al caso base, mientras que el tiempo total disminuye un 3,01%. De esto se podría concluir que, pequeñas perturbaciones en las demandas no afectan significativamente las funciones objetivo

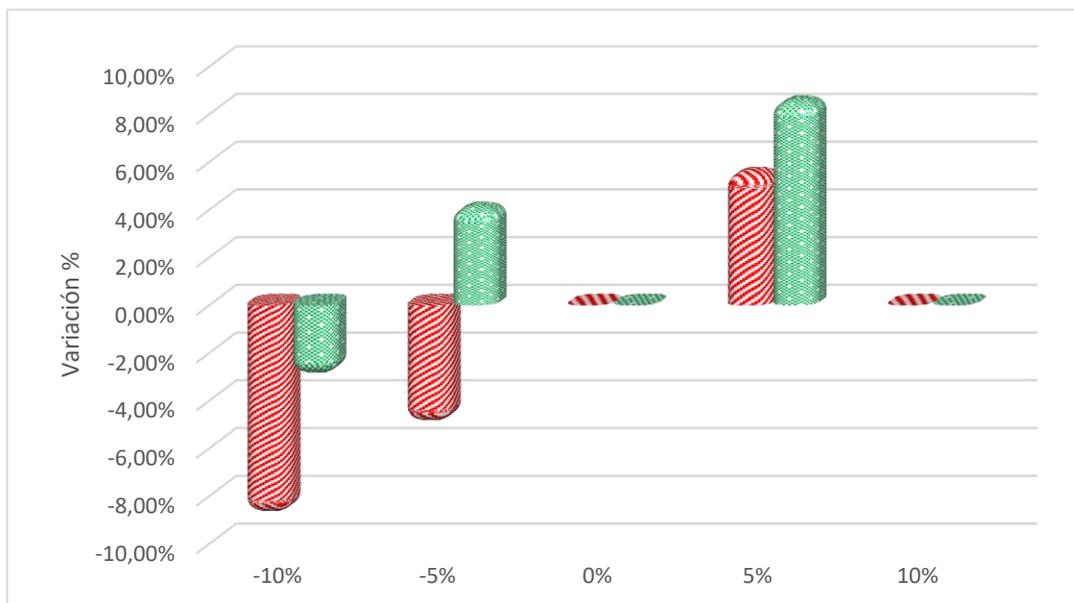


Figura 12. Efectos de la variación de la demanda media de los productos solicitados

6.2.5. Sistema Integrado vs. Sistema Individual

En el análisis presentado a continuación se comparan los resultados de las soluciones obtenidas a través del modelo de planificación, en dos escenarios distintos, considerando el cumplimiento de la demanda semanal de las fábricas. En un escenario, las fábricas están asociadas en una plataforma de *Cloud Manufacturing* por lo que operan bajo el sistema de asignación presentado en la Sección 5. Por otro lado, se plantea el escenario tradicional, en el que las fábricas tienen sus propios clientes y tambos que las abastecen.

Con el presente estudio se pretende mostrar los beneficios, en términos de cumplimiento, de utilizar un sistema integrado donde las fábricas comparten recursos y se rigen bajo un sistema de asignación. Se entiende que se cumple con la asignación cuando la fábrica produce toda la demanda asignada en un periodo de siete días.

Para representar el sistema individual se distribuyen los pedidos de clientes y tambos a las fábricas de forma equitativa. En relación con los pedidos de los clientes, se toma en cuenta los productos que puede producir cada fábrica. Es decir, como las cinco fábricas pueden producir los dos tipos de leche y hay un total de 30 clientes, se asignaron seis clientes a cada una. Mientras que, en el caso de la manteca que solo tres fábricas pueden producirla, se asignaron diez clientes a cada una. En ambos casos se verificó, luego de realizada la distribución, que ninguna fábrica tenga a más de un cliente que no haya solicitado el producto. Por su parte, para la asignación de los tambos, se le asignaron seis tambos a cada una de las cinco fábricas de forma aleatoria, donde los tambos envían toda la leche producida a la misma fábrica.

Se entiende que la distribución explicada anteriormente, es adecuada para la finalidad de este estudio ya que refleja una posible distribución de la realidad y, a priori, no se compromete una fábrica en particular. Esto se debe a que, por un lado, todas las fábricas tienen la capacidad de procesar la leche producida por el tambo con mayor capacidad y el pedido más grande de los clientes. Por otro lado, la producción de los tambos y la capacidad de las fábricas, varían en rangos limitados sin gran diferencia, en donde, para ningún caso, el máximo valor duplica al mínimo.

La solución obtenida a través del sistema integrado del caso de estudio muestra que ninguna fábrica precisaría más de siete días para cumplir con la demanda asignada. Para analizar si las fábricas pueden cumplir con la demanda en el plazo de una semana, en el sistema individual, T a 14 días. En otras palabras, para cuantificar el cumplimiento se le permite a las fábricas realizar la producción en dos semanas en lugar de una, para asegurar que el modelo tenga una solución factible para la demanda asignada.

Por su lado, para ambos sistemas, se considera que la fecha de entrega (FE_{pc}) de los productos solicitados por cada cliente es siete días.

Con las consideraciones de cardinalidad del conjunto T y FE_{pc} , si en la solución óptima obtenida para cada fábrica evaluada de manera individual la función objetivo tiene un valor mayor a 0, significa que en la planificación semanal se tendrán retrasos en los pedidos. En otras palabras, la fábrica no puede cumplir con la demanda en el periodo de una semana.

Los resultados del presente análisis se muestran en la Tabla 27, donde las columnas Sistema Individual y Sistema Integrado muestran la solución óptima obtenida a través del modelo de planificación, de ambos sistemas explicados en esta sección.

Tabla 27. Comparación de la solución óptima obtenida en un sistema individual y uno integrado

| Fábricas | Sistema Individual | Sistema Integrado |
|----------|--------------------|-------------------|
| F1 | 598 | 0 |
| F2 | 3.370 | 0 |
| F3 | No Factible | 0 |
| F4 | 4.609 | 0 |
| F5 | No Factible | 0 |

Se puede observar que la solución óptima en el sistema integrado es 0 para todas las fábricas. Esto es esperable ya que el sistema de asignación asegura que las fábricas puedan atender las órdenes de los clientes y procesar toda la leche enviada por los tambos en el periodo de una semana.

Por otro lado, al observar la solución óptima en el sistema individual se tiene que las fábricas F1, F2 y F4 tuvieron retrasos en sus pedidos y las fábricas F3 y F5 no tienen una solución factible. Esto último se explica porque la leche que estas fábricas reciben de los tambos diariamente no puede ser procesada en el día por ninguna de ellas.

Este estudio muestra una de las ventajas del modelo de asignación planteado en la Sección 5, a través del cual se obtiene una asignación en la que todas las fábricas cumplen con la demanda semanal de los clientes. Esto no puede asegurarse en un sistema individual donde no hay colaboración entre las fábricas.

Luego de realizar los diferentes análisis de sensibilidad, se puede concluir que el valor objetivo del modelo no sufre grandes alteraciones ante variaciones de ciertos parámetros. Este comportamiento se puede observar en los primeros cuatro casos de sensibilidad. A su vez, se puede apreciar el beneficio que se logra por utilizar un sistema integrado en lugar de uno individual, donde este último no puede afrontar la demanda asignada de forma aleatoria en un horizonte de planificación semanal.

7. Conclusiones

Como primera conclusión, podemos decir que se cumplió con el objetivo de realizar una investigación detallada de la bibliografía que existe actualmente acerca de la temática de *Cloud Manufacturing*. Para esto se realizó una revisión sistemática de la literatura, siguiendo los pasos que identifican dicha metodología (lo que permitiría que, en caso de que sea utilizada por cualquier otra persona en cualquier momento, se obtengan los mismos resultados). Esta revisión posibilitó la publicación del artículo *Scheduling in cloud manufacturing systems: Recent systematic literature review*, elaborado en conjunto por el grupo y los tutores.

Por otro lado, si bien no pudimos encontrar aplicaciones de *Cloud Manufacturing* en Uruguay, se logró adaptar una realidad de la industria para realizar el estudio de aplicación. La industria láctea es un sector muy importante para nuestro país y realizar estos estudios para poder analizar diferentes alternativas en la aplicación de la tecnología, traería grandes beneficios. A su vez, discutir sobre conceptos como compartir recursos, descentralizar la producción y poder asignar tareas en otras fábricas, puede ser de gran utilidad para las pequeñas empresas en esta industria. Lograr asociaciones entre pequeños productores, puede fortalecer a los mismos ante variaciones naturales que existe en esta industria y de esa manera terminar fortaleciendo a la industria láctea del país como un todo.

Lograr una asignación y planificación a través del sistema planteado con un respaldo matemático cumple de acuerdo con lo que plantea Fisher et al. [10], con una de las características más destacada de *Cloud Manufacturing*, el intercambio transparente y de una variedad de recursos de fabricación distribuidos geográficamente. Se logró obtener una solución factible que cumple con las distintas restricciones de la realidad y logra optimizar los resultados, tanto para los clientes como para el conjunto de fábricas.

Otra ventaja del sistema planteado con respecto a la realidad de las empresas es poder ampliar el horizonte de planificación. Actualmente, tal como se describe en la Sección 3, la producción se determina el propio día en función de la cantidad de leche recolectada. Con el nuevo sistema, los métodos cuantitativos aplicados que consideran las principales restricciones de la propia industria permiten al tomador de decisiones extender su horizonte de planificación y poder contar con mayor cantidad de información valiosa.

Luego de relevada la situación actual de la empresa que nos acompañó a lo largo del proyecto y habiendo planteado las bases para la aplicación de los principales conceptos de *Cloud Manufacturing*, se elaboraron los modelos matemáticos. Estos modelos contemplan la asignación de los órdenes y planificación de las tareas de producción teniendo en cuenta determinadas restricciones indispensables para pensar en la aplicación de los modelos en la industria.

Las funciones objetivo de los modelos fueron, por un lado, minimizar los costos y tiempos de fabricación de órdenes (modelo de asignación). Por otro lado, disminuir los atrasos en la elaboración de los productos con respecto a la fecha de entrega indicada por los clientes (modelo de planificación). Los datos utilizados para ambos modelos fueron determinados a partir de los datos compartidos por la empresa ya mencionada.

De acuerdo con los resultados obtenidos (explicados en la Sección 6) queda evidenciados que, de haber trabajado de manera individual todas las fábricas habrían presentado retrasos, ya sea por no poder cumplir con la demanda en el correr de la semana o por incapacidad para procesar la totalidad de la leche recibida. Con este caso de sensibilidad, se evidencia que, al trabajar de manera conjunta, los tiempos de fabricación se ven optimizados.

A partir del trabajo realizado a lo largo de este proyecto, esperamos que el mismo pueda ser utilizado como motivación para otros grupos deseen involucrarse con Cloud Manufacturing. Consideramos que puede complementar el trabajo con estudios de otras áreas, como, por ejemplo, el desarrollo de la plataforma para que permita el ingreso de órdenes de clientes. A su vez, se podría asociar los modelos matemáticos a la plataforma, para realizar la asignación y planificación en las distintas fábricas, a partir de lo solicitado por los clientes.

Cloud Manufacturing abarca temas como planificación de producción, inclusión de tecnología en la industria, desarrollo de software para utilizar en la industria, manejo de datos, entre otros. Esto muestra claramente que es un tema multidisciplinario, donde para lograr un trabajo completo del mismo es necesario que sea abordado por especialistas en cada uno de estos temas, para afrontar los diferentes frentes de este paradigma.

Además del desarrollo e implementación de una plataforma web que contemple cada uno de los puntos mencionados en la Sección 4.5, otra de las posibles mejoras que debería de ser considerada para dicho desarrollo sería lograr obtener una solución que, además de costos y tiempo, equilibre las ganancias de cada una de las empresas participantes. Para lograr esto, sería necesario considerar los precios de venta de los productos, algo que no se toma en cuenta para este trabajo.

Por último, incluir un módulo de ruteo de camiones para la recolección de leche y entrega de productos traería asociada una mejora en la optimización de los tiempos y costos de la fase inicial y final de la cadena de producción. En el presente trabajo se consideró un estimativo de viajes en la semana, cuando en la realidad es necesario recolectar leche todos los días de los tambos.

Sin dudas, consideramos que la aplicación de temas vanguardistas en la comunidad científica mundial en la industria nacional, aún sin considerar una aplicación completa, es de gran importancia tanto para la propia industria como para el propio prestigio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. A nosotros como estudiantes, nos enorgullece haber podido lograr esto.

Bibliografía

- [1] Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R. X., & Wu, D. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 144-156.
- [2] Li, B. H., Zhang, L., Wang, S. L., Tao, F., Cao, J. W., Jiang, X. D., Song, X., & Chai, X. D. (2010). Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 16(1), 1-7.
- [3] Liu, Y., Wang, L., Wang, X. V., Xu, X., & Jiang, P. (2019a). Cloud manufacturing: key issues and future perspectives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(9), 858-874.
- [4] INALE. Situación y Perspectiva de la Lechería Uruguaya https://www.inale.org/wp-content/uploads/2020/06/Situaci%C3%B3n-y-Perspectivas-lecher%C3%ADa-uruguay-2019_comp.pdf
Último acceso: 22/5/2021
- [5] Adamson, G. (2018). A Novel Method for Adaptive Control of Manufacturing Equipment in Cloud Environments.
- [6] CEPAL. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/44954/S1901011_es.pdf
Último acceso: 15/5/2021
- [7] Junta de Andalucía. Cloud Computing aplicado a los sectores de la agroindustria, eficiencia energética, industrias culturales y turismo. <http://www.adimenlehiakorra.eus/documents/29934/43025/Cloud+Computing+aplicado+a+los+sectores+de+la+agroindustria%2C.pdf/639cd5df-30c3-4704-8d64-1f6ac7f70322>
Último acceso: 15/5/2021
- [8] Xu, X. (2012). From cloud computing to cloud manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(1), 75-86.
- [9] Wu, D., Rosen, D. W., Wang, L., & Schaefer, D. (2015). Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Computer-Aided Design*, 59, 1-14.
- [10] Fisher, O., Watson, N., Porcu, L., Bacon, D., Ringley, M., & Gomes, R. L. (2018). Cloud manufacturing as a sustainable process manufacturing route. *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 53-68.
- [11] Liu, Y., Wang, L., Wang, X. V., Xu, X., & Zhang, L. (2019b). Scheduling in cloud manufacturing: state-of-the-art and research challenges. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 4854-4879.

- [12] Liu, Y., Zhang, L., Wang, L., Xiao, Y., Xu, X., & Wang, M. (2019c). A framework for scheduling in cloud manufacturing with deep reinforcement learning. In 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN) (Vol. 1, pp. 1775-1780). IEEE.
- [13] Microsoft Azure – ¿Qué es la nube?
<https://azure.microsoft.com/es-es/overview/what-is-the-cloud/>
Último acceso: 17/07/2021
- [14] Pinedo, M., & Hadavi, K. (1992). Scheduling: theory, algorithms and systems development. In Operations Research Proceedings 1991 (pp. 35-42). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [15] Delaram, J., & Valilai, O. F. (2018). A mathematical model for task scheduling in cloud manufacturing systems focusing on global logistics. *Procedia Manufacturing*, 17, 387-394.
- [16] Suma, T., & Murugesan, R. (2019). Study on multi-task oriented service composition and optimization problem of customer order scheduling problem using fuzzy min-max algorithm. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 10, 219-231.
- [17] Vahedi-Nouri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rohaninejad, M. (2019). A multi-objective scheduling model for a cloud manufacturing system with pricing, equity, and order rejection. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2177-2182.
- [18] Akbaripour, H., Houshmand, M., Van Woensel, T., & Mutlu, N. (2018). Cloud manufacturing service selection optimization and scheduling with transportation considerations: mixed-integer programming models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1), 43-70.
- [19] Wang, D., Yu, Y., Yin, Y., & Cheng, T. C. E. (2021). Multi-agent scheduling problems under multitasking. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3633-3663.
- [20] Oficina de Planeamiento y Presupuesto. Una prospectiva estratégica del sector Agroalimentario uruguayo.
https://www.opp.gub.uy/sites/default/files/documentos/2020-02/16_Una%20prospectiva%20estrat%C3%A9gica%20del%20sector%20Agroalimentario%20uruguayo.pdf
Último acceso: 10/5/2021
- [21] INALE – Instituto Nacional de la Leche
<https://www.inale.org/uruguay-lechero/>
Último acceso: 01/05/2021

- [22] World Bank Group. Integración a las Cadenas de Valor Mundiales: La Industria Láctea y la Industria de las TIC.
<http://documents1.worldbank.org/curated/ru/782931537966455281/pdf/AUS17180-WP-P157902-PUBLIC-SPANISH-ESPANOL-GLOBAL-VALUE-CHAINS-c-final.pdf>
Último acceso: 10/5/2021
- [23] Ciencia Unisalle – Análisis del sector lechero y aplicaciones tecnológicas de la industria 4.0.
<https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2617&context=economia>
Último acceso: 17/07/2021
- [24] INALE. Leche en polvo entera de Uruguay en el mercado de China
https://www.inale.org/wp-content/uploads/2018/05/Gui%CC%81a_Exportacio%CC%81n_LPACHINA2017.pdf
Último acceso: 13/06/2021
- [25] Alderete, M. V. (2015). Redes de pymes: una visión desde las teorías de club y de equipo. Revista de Economía Institucional, 17(32), 317-348.

Anexo I: Estado del Arte

Universidad de la República
Facultad de Ingeniería
Proyecto de Grado - Ingeniería de Producción

Estado del Arte

Supply Chain en Entornos de Cloud Manufacturing

Setiembre 2020

Autores:

Agustín Halty Rivero

Rodrigo Sánchez Varela

Valentín Vázquez Dalmás

Tutores:

Ing. Pedro Piñeyro

Ing. Daniel Rossit

Ing. Victor Viana

Índice

| | |
|--|-----|
| 1. Glosario | 107 |
| 2. Introducción | 109 |
| 3. Presentación Detallada de la Problemática | 111 |
| 4. Conceptos Claves..... | 115 |
| 4.1. Cloud Computing..... | 115 |
| 4.2. Scheduling..... | 116 |
| 4.3. Cadena de Suministro (Supply Chain)..... | 117 |
| 4.4. Optimización Multiobjetivo | 117 |
| 5. Procedimiento de Programación en Cloud Manufacturing..... | 119 |
| 6. Procesos Fundamentales para la Obtención de un Scheduling eficaz y eficiente..... | 121 |
| 6.1. Task decomposition..... | 121 |
| 6.2. Resource, Service & Matching, Discovery, Selection..... | 122 |
| 6.3. Configuration, Allocation or Composition | 123 |
| 6.4. Scheduling..... | 124 |
| 7. Revisión Sistemática de la Literatura..... | 127 |
| 7.1. Metodología..... | 127 |
| 7.1.1. Criterios de clasificación de la literatura..... | 128 |
| 7.1.2. Consolidación de los Resultados Obtenidos..... | 130 |
| 7.1.3. Clasificación inicial en función del título y abstract..... | 130 |
| 7.1.4. Clasificación final..... | 131 |
| 7.2. Análisis estadístico | 132 |
| 7.3. Análisis Scheduling..... | 136 |
| 7.3.1. Métodos de Resolución | 137 |
| 7.3.2. Discusiones y Futuras Investigaciones | 144 |

Bibliografía

1. Glosario

Stakeholders: en la cadena de suministro se entiende por stakeholders a todos aquellos actores que sus intereses pueden verse afectados directa o indirectamente por esta.

Grid-computing: es una tecnología que permite utilizar de forma coordinada recursos heterogéneos (entre ellos procesadores, almacenamiento y aplicaciones específicas) que no están sujetos a un control centralizado. Es una forma de computación distribuida, en la cual los nodos participantes pueden ser de iguales o distintas arquitecturas y cubrir toda la gama de potencia de cómputo, desde embebidos hasta supercomputadoras.

Internet of Things (IoT): La definición de IoT podría ser la agrupación e interconexión de dispositivos y objetos a través de una red (bien sea privada o Internet, la red de redes), donde todos ellos podrían ser visibles e interactuar. Respecto al tipo de objetos o dispositivos podrían ser cualquiera, desde sensores y dispositivos mecánicos hasta objetos cotidianos como pueden ser el frigorífico, el calzado o la ropa. Cualquier cosa que se pueda imaginar podría ser conectada a internet e interactuar sin necesidad de la intervención humana, el objetivo por tanto es una interacción de máquina a máquina, o lo que se conoce como una interacción M2M (machine to machine) o dispositivos M2M.

Big Data: Es un término que describe el gran volumen de datos, tanto estructurados como no estructurados, que inundan los negocios cada día. Pero no es la cantidad de datos lo que es importante. Lo que importa con el Big Data es lo que las organizaciones hacen con los datos. Big Data se puede analizar para obtener ideas que conduzcan a mejores decisiones y movimientos de negocios estratégicos.

Infraestructure as a Service (IaaS): Infraestructura como servicio (IaaS) es una oferta de cloud computing en la que un proveedor proporciona a los usuarios acceso a recursos de cálculo como servidores, almacenamiento y redes. Las empresas utilizan sus propias plataformas y aplicaciones en una infraestructura de proveedor de servicios.

Platform as a Service (PaaS): Un proveedor de servicios ofrece acceso a un entorno basado en la nube, donde los usuarios pueden desarrollar y ofrecer aplicaciones. El proveedor suministra la infraestructura subyacente.

Service as a Service (SaaS): Es un modelo de distribución de software en el que tanto el software como los datos manejados son centralizados y alojados en un único servidor externo a la empresa. Esto implica que el software utilizado por la empresa no se encuentra en la misma, sino que un proveedor se ocupa del hosting de dicho software en la nube, así como del mantenimiento y el soporte.

Inteligencia Artificial: La Inteligencia artificial es el campo científico de la informática que se centra en la creación de programas y mecanismos que pueden mostrar comportamientos considerados inteligentes. En otras palabras, la IA es el concepto según el cual “las máquinas piensan como seres humanos”. Normalmente, un sistema de IA es capaz de analizar datos en grandes cantidades (big data), identificar patrones y tendencias y, por lo tanto, formular predicciones de forma automática, con rapidez y precisión.

Machine Learning: Es una disciplina científica del ámbito de la Inteligencia Artificial que crea sistemas que aprenden automáticamente. Aprender en este contexto quiere decir identificar patrones complejos en millones de datos. La máquina que realmente aprende es un algoritmo que revisa los datos y es capaz de predecir comportamientos futuros. Automáticamente, también en este contexto, implica que estos sistemas se mejoran de forma autónoma con el tiempo, sin intervención humana.

Heurística: Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema complejo de optimización mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución de manera eficiente.

Meta-Heurística: Clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son ni efectivos ni eficientes. Los metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y la mecánica estadística.

2. Introducción

El objetivo de este documento es introducir al lector en la literatura de la programación de tareas y actividades, a lo largo de toda la cadena de suministro, en entornos de *Cloud Manufacturing* (CMfg). Se busca mostrar en qué fase de desarrollo se encuentra el tema en el ambiente científico.

Durante los últimos años, con las nuevas tendencias y requerimientos de la fabricación industrial (globalización, individualización, digitalización, colaboración e integración) y las nuevas tecnologías emergentes (por ejemplo, cloud computing, internet of things (IoT), sistemas ciber-físicos, big data analytics e inteligencia artificial), se propuso un nuevo paradigma de fabricación denominado *Cloud Manufacturing*.

Este nuevo concepto brinda el soporte para la vinculación, a través de la nube, para generar nuevas relaciones entre agentes los cuales anteriormente no se encontraban relacionados [1].

A partir de dicha globalización y de los vínculos generados entre los distintos agentes involucrados en el proceso productivo, la coordinación y gestión de actividades se realiza de forma conjunta, logrando una sinergia en la cual se maximiza el uso de capacidades y recursos, aportando habilidades y competencias que ninguno de los agentes hubiese tenido de forma individual. Esta idea es la base del concepto de Cloud Manufacturing [2].

En Cloud Manufacturing, los servicios de producción o fabricación y los clientes que demandan estos servicios están vinculados por una plataforma virtual en la nube [3].

De esta forma, los clientes tienen acceso a un número creciente de proveedores de servicios de fabricación, mientras que los proveedores de servicios, por su parte, tienen acceso a un número mayor de clientes de los que estarían disponibles solo por sus propios medios (Liu et al. [4]).

El modelo de fabricación basado en CMfg aprovecha la posibilidad de acceder, a través de la nube, a un conjunto de recursos de producción distribuidos o diversos que se pueden agrupar bajo demanda (Liu et al. [5]).

Esta agrupación de recursos bajo demanda brinda la posibilidad de generar cadenas productivas que compartan recursos de más de un proveedor de servicios de producción, lo que conlleva a que la producción pueda realizarse en diferentes ubicaciones geográficas (Wu et al. [6]).

Esta flexibilidad en las configuraciones de producción reduce considerablemente los costos del ciclo de vida de los productos (un fabricante no tiene que desarrollar toda la tecnología de producción), así como la asignación óptima de servicio y órdenes de servicio [7].

CMfg permite trabajar como una red conectada de proveedores de recursos, con acceso ubicuo y gran capacidad para virtualizar esos recursos.

Al final de cuentas, el propósito final de CMfg es entregar servicios de fabricación descentralizados a los clientes de la nube, a demanda y a través de internet.

Tal como es mencionado por varios autores entre los que se destacan [8], la programación de estos servicios es un proceso crítico para lograr el objetivo de CMfg. Debido a la importancia de la planificación y al crecimiento de este paradigma, es que surge la motivación de esta investigación.

Para que CMfg funcione correctamente resulta imprescindible una buena planificación (de aquí en adelante, scheduling) en el uso de los recursos, ya que la mala asignación de órdenes de trabajo a recursos puede no solo llevar a una ejecución ineficiente de las operaciones, sino a multiplicar excesivamente los costos de asociados (Akbaripour et al. [3]). Por lo tanto, el diseño de un método de scheduling eficiente que contemple estos aspectos se plantea como desafío para futuras investigaciones [9].

En un ambiente de fabricación o producción, scheduling se puede definir como el proceso de ordenar, controlar y optimizar el trabajo o las cargas de trabajo (Pinedo [10]). En el contexto de CMfg esta puede ser definida de manera estricta o amplia. En sentido estricto, se refiere únicamente al proceso de asignar los recursos/servicios a tareas, supervisar, controlar y optimizar el estado de estos y la ejecución de las tareas, para satisfacer los requisitos individualizados de los clientes. En el sentido amplio comprende, además del proceso de planificación en sentido estrecho, otras actividades como la descomposición de las tareas, el descubrimiento, emparejamiento, selección, y composición de servicios (Tao et al. [11]; Cheng et al. [12]).

El resto del documento se organiza de la siguiente manera: en la Sección [2](#) se realiza una presentación detallada de la problemática. En la Sección [3](#) se explican los conceptos fundamentales de la temática. Luego en la Sección [4](#) se desarrolla un procedimiento de programación de *Cloud Manufacturing*, identificando las diferentes fases. En la Sección [5](#), se especifican los procesos fundamentales para un buen scheduling y se organiza la bibliografía. Por último, en la Sección [6](#) se realiza una búsqueda sistemática de la literatura, donde se explica la metodología para la misma y se desarrolla un análisis estadístico de los resultados, haciendo principal énfasis en aquellos que, de acuerdo con la clasificación utilizada, son clasificados como "Scheduling".

3. Presentación Detallada de la Problemática

Para contextualizar y entender el porqué del surgimiento de Cloud Manufacturing es importante comenzar analizando, desde una perspectiva histórica, los recientes desarrollos de la industria manufacturera junto con sus desafíos y paradigmas.

Como bien menciona Adamson et al. [13] la historia de los últimos 40 años ha mostrado distintas iniciativas cuyo objetivo es destruir el paradigma de la producción en masa. Dentro de dichas iniciativas, se incluyen la customización masiva y la manufactura inteligente, reconfigurable, ágil, geográficamente distribuida y sustentable, entre otros.

La intensa competencia globalizada, junto con la globalización en términos económicos y de recursos, son algunas de las principales características que impulsan la aparición de una nueva forma de manufactura. La introducción de las computadoras, las tecnologías de la información y el rápido desarrollo de las tecnologías asociadas al internet catalizaron dicho crecimiento.

Tal como plantea Fischer et al. [14], CMfg podría definirse como un modelo de fabricación orientado a servicios, que virtualiza los recursos y capacidades de fabricación en servicios, a los que se accede a través de la nube. Esto transforma las líneas de suministro de fabricación que dejan de ser fijas y pasan a ser temporales, y proporciona una mayor flexibilidad y escalabilidad, lo que resulta en una mayor resistencia y sostenibilidad durante todo el proceso de fabricación. CMfg es una plataforma multi-inquilino, inteligente y basada en el conocimiento que puede proporcionar soluciones sostenibles a lo largo del ciclo de vida del producto y el proceso, a través de una colaboración efectiva, minería de datos y comunicación a través de la red de desarrolladores, fabricantes y consumidores.

CMfg provee elasticidad, flexibilidad y adaptabilidad a través del aprovisionamiento a demanda de recursos de manufactura, así como servicios en el cual se habilitan ciertas características fundamentales y necesarias para el éxito del propio CMfg, como lo son la escalabilidad y la forma de pago pay-as-you-go.

Una de las características más destacada de cloud manufacturing es el intercambio transparente y conveniente de una variedad de recursos de fabricación distribuidos geográficamente.

Su principio de funcionamiento es que los proveedores organicen y encapsulen los recursos y capacidades de fabricación de forma efectiva para que estos queden disponibles a los consumidores como servicios en una nube de fabricación, como se muestra en la [Figura 1](#).

El resultado es que las empresas puedan obtener diversos servicios de fabricación desde la nube (Internet) de la misma manera en la que obtienen agua o electricidad en vida diaria.

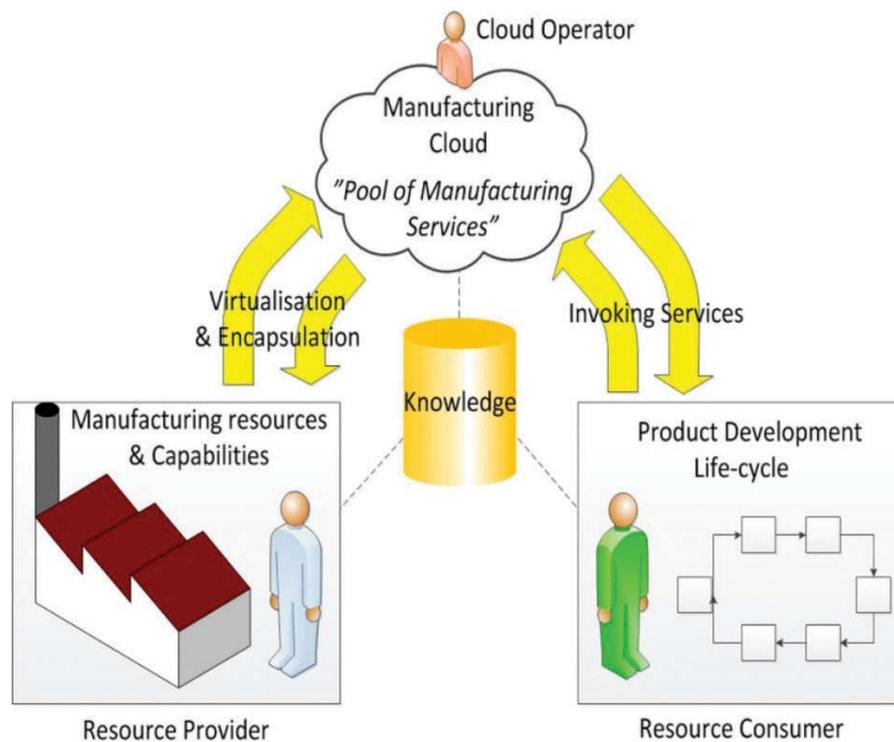


Figura 1. Concepto de Cloud Manufacturing. Fuente: Adamson et al. [2017](#)

Una plataforma de servicio de cloud manufacturing realiza una búsqueda, mapeo inteligente, recomendación y ejecución de un servicio. La [Figura 2](#) ilustra la estructura de un sistema de CMfg, el cual consiste en cuatro capas: capa de recursos de fabricación, capa de servicio virtual, capa de servicio global y capa de aplicación.

La capa de recursos de fabricación comprende los recursos que son requeridos durante el ciclo de vida del desarrollo del producto. Estos recursos pueden tomar dos formas, recursos físicos de fabricación y capacidades de fabricación. Los recursos físicos pueden existir en forma de hardware o software. Los primeros incluyen, equipamiento, computadoras, servidores, materia prima, etc. Los últimos incluyen, por ejemplo, software de simulación, herramientas de análisis, “know-how”, data, standards, empleados, etc. Las capacidades de fabricación son recursos intangibles y dinámicos que representan la capacidad de una organización de llevar a cabo una tarea en particular.

La capa de servicios virtuales de fabricación tiene como funciones clave identificar los recursos de fabricación, virtualizarlos, y empaquetarlos en servicios de CMfg. En comparación con un ambiente tradicional de cloud computing, es mucho más desafiante realizar estas funciones para la aplicación de CMfg. Para identificar los recursos de manufactura se pueden utilizar una amplia gama de tecnologías, por ejemplo, RFID, RFID computacional, redes de sensores inalámbricos, IoT, sistemas ciber-físicos, GPS, *clustering* y análisis, etc. El hardware de fabricación (por ejemplo, las máquinas) generalmente es mapeado para convertirse en máquinas virtuales que luego serán asignadas y coordinadas por herramientas tecnológicas, encargadas de gestionar la virtualización.

La capa de servicio global (CSG) se basa en un conjunto de tecnologías de implementación en la nube (es decir, PaaS). Para proporcionar servicios en la nube de forma dinámica y ágil a las empresas de fabricación, es necesario una gestión centralizada y efectiva. Basándose en la naturaleza de los recursos de fabricación y los requerimientos específicos de los usuarios, dos modos de operación pueden tener lugar en la CSG, el modo de servicio completo y el modo de servicio parcial. En el modo completo, la CSG es la responsable de todas las actividades operativas de la nube. Los tipos de servicio que se adaptan a este modo son los recursos computacionales virtualizados, por ejemplo, CPU, RAM y redes. Estos servicios pueden ser monitoreados de forma dinámica, gestionados y cargados de forma balanceada con facilidad. Los softwares de aplicación también son adecuados para el modo completo ya que se puede correr y ejecutar el software en ambientes informáticos distribuidos, aprovechando el *Grid-computing* y *parallel computing*.

En el modo de servicio parcial, el proveedor de servicio proporciona insumos y actividades operacionales. Generalmente, el hardware de fabricación (por ejemplo, herramientas, máquinas y dispositivos experimentales) corresponde a este tipo de servicios.

La CSG es principalmente responsable de localizar, asignar, calcular tarifas y monitorear de forma remota a los recursos de fabricación. Los proveedores de hardware son los responsables de ejecutar las tareas y asegurar la calidad del trabajo de fabricación. Para poder cumplir con los requisitos de la empresa mencionados previamente, se necesitan algunas tecnologías críticas. La selección óptima de recursos y métodos de asignación son necesarios para garantizar un servicio de CMfg efectivo.

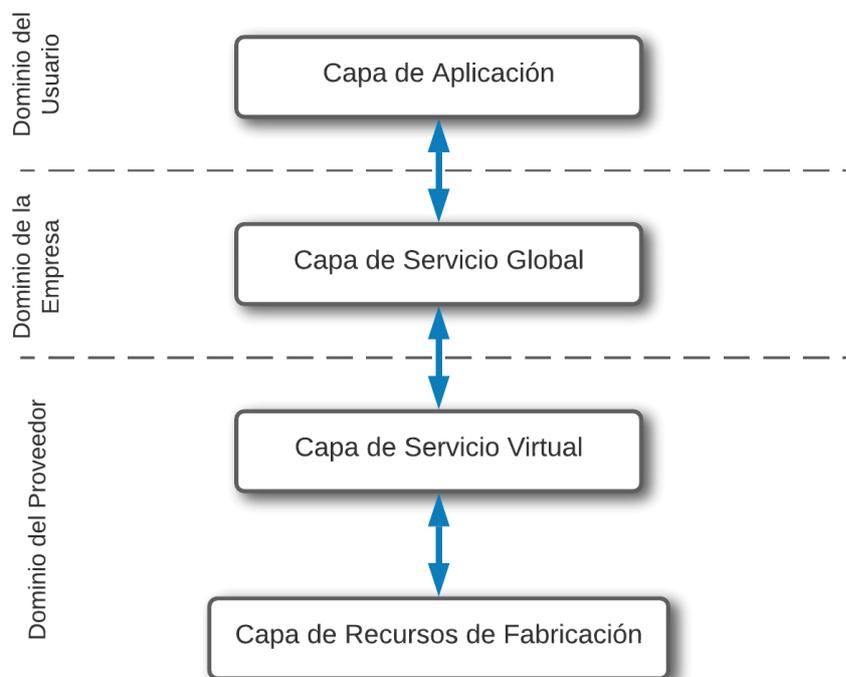


Figura 2. Arquitectura en capas de un sistema de Cloud Manufacturing

La capa de aplicación sirve como una interfaz entre el usuario y los recursos de fabricación de la nube. Proporciona terminales de cliente y de computadores. Algunos ejemplos de interfaces son herramientas de modelado de sistemas complejos, terminales de simulación, y utilidades de desarrollo de nuevos productos. Un usuario puede definir y construir una aplicación de fabricación a través de recursos virtualizados. Una aplicación de este tipo a menudo implica servicios de recursos de fabricación más completos que proporcionan a los usuarios un servicio de valor agregado.

4. Conceptos Claves

En esta sección se definirán conceptos que resultan de importancia para el entendimiento de scheduling en cloud manufacturing.

4.1. Cloud Computing

Según la definición del National Institute of Standards and Technology [15] cloud computing es un modelo para permitir accesos a un grupo compartido de recursos de computación configurables (por ejemplo, redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios). Estos accesos se caracterizan por ser a demanda y ubicuos, es decir que se puede acceder desde cualquier lugar y al mismo tiempo. A su vez pueden ser provisionados rápidamente y liberados con un esfuerzo mínimo de la gerencia o de interacción con el proveedor del servicio.

En cloud computing todo es tratado como servicio, a lo que se hace referencia como XaaS (Anything as a Service). Entre los servicios de cloud computing se encuentran software como servicio (SaaS), plataforma como servicio (PaaS) e infraestructura como servicio (IaaS). Estos definen una arquitectura en capas del sistema. En la capa de IaaS, se definen como servicios estandarizados en la red los recursos de procesamiento, almacenamiento, redes y otros. Los clientes de la nube pueden correr sistemas operativos y software en la infraestructura “contratada”. La capa de PaaS proporciona abstracciones y servicios para el desarrollo, testing, implementación, hosting y mantenimiento de aplicaciones en un entorno integrado de desarrollo. Por último, la capa de aplicación proporciona un set completo de aplicaciones de SaaS [16].

El software como servicio ofrece una plataforma donde se utilizan recursos comunes y una sola instancia, tanto del código objeto de una aplicación como la base de datos subyacente, para dar soportes a múltiples clientes de forma simultánea. Ejemplos de proveedores clave de SaaS son: Salesforce Customer Relationships Management system (CRM), NetSuite y la aplicación de Google Office Productivity. La plataforma como servicio ofrece a desarrolladores una plataforma que incluye todos los sistemas y ambientes comprendidos en el ciclo de vida del desarrollo, pruebas, implantación y hosting de aplicaciones web. Amazon EC2 y Facebook F8 son ejemplos de PaaS. Por último, la infraestructura como servicio, a veces llamada hardware como servicio, es muy utilizada por empresas ya que elimina la necesidad de invertir y gestionar sus propios sistemas de tecnología de información (TI). GoGrid, Mosso/Rackspace, MSP On-Demand y masterIT son algunos de los proveedores pioneros de IaaS.

En cuanto a la adopción de cloud computing en el sector de fabricación, las áreas clave están en torno a la TI y los nuevos modelos comerciales que la computación en la nube puede admitir fácilmente, como el pago por uso, la conveniencia de escalar hacia arriba y hacia abajo según la demanda y la flexibilidad en la implementación y personalización de soluciones.

El costo-beneficio de adoptar la nube en una empresa manufacturera puede ser múltiple. El ahorro obtenido por la eliminación de algunas de las funciones que eran fundamentales en la TI tradicional puede ser significativa. Con soluciones basadas en la nube, algunas personalizaciones de aplicaciones y ajustes que la empresa necesita en el nivel de proceso puede ser tratado por el sector de TI de la empresa junto con

algunas de las tecnologías inteligentes de computación en la nube. Cuando se inicia una forma diferente de ejecutar un proceso, el personal de TI puede hacer que el cambio suceda sin problemas y en menos tiempo.

Cuando se trata de dar soporte a procesos de negocio inteligentes, cloud computing puede ser efectivo ya que ofrece soluciones business-to-business (B2B) para transacciones entre empresas, por ejemplo entre el fabricante y el mayorista, o entre el mayorista y el minorista.

Otro beneficio para las empresas que adoptan cloud computing, es que la colaboración entre las empresas puede ocurrir a una escala mucho mayor. Dentro de la organización, la planificación de la demanda y la cadena de suministro se pueden entrelazar en un sistema basado en la nube, permitiendo a diferentes partes de la organización a echar un vistazo a las oportunidades en las que sus equipos de venta están trabajando. En este caso la nube proporciona un ambiente colaborativo que ofrece, a las personas de la organización, agilidad, más transparencia y empoderamiento a través de colaboraciones más efectivas.

Cloud computing está cambiando la manera en que industrias y empresas hacen sus negocios en cuanto a la escalabilidad y virtualización de los recursos como un servicio a través de Internet. Puede transformar el modelo tradicional de los negocios de manufactura, ayudarle a alinear la innovación de productos con la estrategia de negocios, y crear redes de fábricas inteligentes que pretenden una comunicación efectiva. Dando lugar al surgimiento de CMfg, que inspirada en cloud computing, comienza el paso de la fabricación orientada a la producción a la fabricación orientada al servicio [15].

4.2. Scheduling

Scheduling consiste en organizar en el tiempo un conjunto de tareas, donde existe una cantidad limitada de recursos. Estos recursos pueden ser el tiempo, maquinaria, personal, material, entre otros. En los problemas de scheduling, se busca planificar y optimizar las cargas de trabajo, asignando recursos a las diferentes tareas, bajo un conjunto de restricciones y optimizando una función objetivo.

Los problemas de scheduling se encuentran en casi toda la industria y presentan una alta complejidad computacional. Es por esto que para resolver los mismos se aplican algoritmos heurísticos.

A su vez, este es un tema central dentro de cloud manufacturing, donde se quiere mejorar la utilización de los recursos, reduciendo el costo del servicio y respondiendo rápidamente al usuario con buena calidad. Una particularidad dentro de cloud manufacturing es que se puede compartir los recursos entre los distintos servicios. Según Zhou et al. [17] scheduling tiene un alto grado de complejidad, debido a la interacción, la disponibilidad y el entorno operativo. Esto hace incluso que sea un tema de mayor complejidad que scheduling en cloud computing. En comparación con la asignación de tareas en un entorno tradicional, CMfg tiene las siguientes características:

1. Las tareas son más diversas en aspectos funcionales y no funcionales debido a la alta individualización requerida según la empresa que lo proporciona
2. Los estados de servicio en CMfg son más inciertos, debido a que no se tiene un completo control sobre los recursos de los proveedores de servicios.

3. Los estados en los servicios.
4. Los servicios del mismo tipo pueden ser realizados por empresas distintas, con capacidades diferentes.
5. La calidad de servicio servicios de CMfg son más dinámicos.

4.3. Cadena de Suministro (Supply Chain)

Es un sistema que está conformado por los distintos actores de la producción y distribución de un producto, entre estos se encuentran los proveedores, almacenes, canales de distribución y cliente final. Representa los pasos necesarios para llevar el producto en su estado original, que al largo del proceso se va modificando hasta el cliente final. Una característica es que está conformada por productos tangibles como por servicios intangibles, por ejemplo, la logística.

Este sistema es dinámico y se ve afectado por las dependencias de los diferentes stakeholders que están interconectados por procesos. Los principales flujos dentro de la cadena de suministro son: de productos, de información y financieros. El primero comprende el flujo de mercancía desde los proveedores a los clientes, mientras que el flujo de información conlleva la comunicación de pedidos e información sobre el estado de entrega. Por último, el flujo financiero está vinculado con la forma de pago. Estos procesos involucran distintos recursos y se debe buscar una buena coordinación para maximizar el valor creado para la organización.

La gestión de cadena de suministro es donde se analiza cómo realizar una buena gestión de los flujos de bienes y servicios. La misma es la integración de los procesos de negocios clave desde el usuario final hasta los proveedores originales, que proveen productos, servicios e información, agregando valor para los clientes y stakeholders. Dentro de las metas se encuentra desarrollar equipos focalizados en el cliente, donde también se pueda generar contactos con todos estos para recibir y procesar inquietudes. A su vez, se quiere alinear la demanda con el abastecimiento y desarrollar manufacturas que sean flexibles para poder responder a cambios. Por último, es muy importante cumplir con todos los pedidos y a tiempo. Para poder implementarlo de manera correcta, es necesario el soporte al más alto nivel de las organizaciones, que estén comprometidos con el cambio, así como que haya un acuerdo entre todos los miembros de la cadena en la visión y procesos claves de esta.

4.4. Optimización Multiobjetivo

La optimización multiobjetivo (también conocida como programación multiobjetivo, optimización vectorial, optimización multicriterio, optimización multi-atributo u optimización de Pareto) puede definirse como un área de toma de decisiones de criterios múltiples, principalmente relacionada con problemas de optimización matemática en los cuales se presentan más de una función objetivo a optimizar de manera simultánea.

Campos como la ciencia y la ingeniería han aplicado la optimización multiobjetivo para situaciones donde dos o más objetivos pudieran estar en conflicto y en las que, de alguna manera, es necesario aplicar algún tipo de compensación entre los mismos para la obtención de una decisión óptima.

De hecho, en muchas aplicaciones prácticas de ingeniería, los diseñadores toman decisiones entre objetivos contrapuestos, como maximizar el rendimiento y minimizar el consumo de combustible y la emisión de contaminantes de un vehículo. En estos casos, se debe realizar un estudio de optimización multiobjetivo, que proporciona múltiples soluciones que representan las compensaciones entre las distintas funciones objetivo.

Es importante destacar que, incluso para un problema trivial de optimización multiobjetivo, es poco probable que exista una única solución que optimice simultáneamente cada objetivo.

En muchos casos, se dice que las funciones objetivas están en conflicto y existen posiblemente un número infinito de soluciones óptimas de Pareto. En esta línea, se define como solución no dominada a aquella en la que ninguna de las soluciones de las distintas funciones objetivo puede mejorarse en valor sin degradar alguno de los demás objetivos. Estas soluciones se denominan óptimas de Pareto.

El método de las ponderaciones propone, a partir de un problema multiobjetivo, crear problemas mono-objetivos asociados a él. Para esto, se le asigna valor λ a cada función de forma que la importancia relativa dentro del problema multiobjetivo sea diferente para cada una de esas funciones. Esta ponderación tiene un carácter subjetivo, y corresponde la elección de los valores al analista, el cual debe estudiar detenidamente las consecuencias de establecer esa valoración. Tras realizar esta ponderación, se resuelve el problema mono-objetivo resultante.

5. Procedimiento de Programación en Cloud Manufacturing

En el proceso de programación en cloud manufacturing se pueden identificar cinco fases generales. Las mismas se ven en la [Figura 3](#) y pueden definirse como:

1. Envío de la orden / tarea: El proceso de programación comienza con el envío de las órdenes/tareas de los clientes. En términos de requerimientos funcionales, las tareas se pueden clasificar en tareas de diseño, tareas de fabricación, tareas de prueba, etc., o la combinación de estas.
2. Procesamiento preliminar de la orden / tarea: Luego de que las órdenes / tareas son enviadas a la plataforma en la nube, en primer lugar deben ser procesadas de forma preliminar, incluyendo su clasificación, descripción, análisis, descomposición, etc. Luego del procesamiento preliminar, los requisitos funcionales y no funcionales de cada tarea, son especificados de forma clara. Los requisitos funcionales se refieren a la función que se debe realizar para completar la tarea (por ejemplo, un producto o una parte con una función específica), lo que requiere la invocación y ejecución de determinados tipos de servicio. Mientras que los no funcionales se refieren a criterios como, tiempo, costo, calidad, y sus respectivas restricciones.
3. Programación de tareas: Una vez finalizado el procesamiento preliminar de la orden, el módulo de gestión de la programación lleva a cabo la programación de tareas, con ayuda de los módulos de soporte, de gestión de servicio y de gestión de monitoreo.

El módulo central de programación es responsable de gestionar las métricas, reglas, métodos y algoritmos de programación y al módulo de gestión de la programación, por ejemplo, determinando métodos de programación.

El módulo de gestión de servicio es el encargado de gestionar las actividades relacionadas con los servicios que son necesarias para la programación, incluyendo clasificación de servicios, búsqueda y emparejamiento, composición, evaluación, etc.

El módulo de gestión de monitoreo juega un rol importante monitoreando el estado de los recursos y órdenes en las fábricas (Li et al. [18]), proporcionando esta información en tiempo real (por ejemplo, disponibilidad de las máquinas), lo que es necesario para lograr una programación óptima (Wang [19]); Mourtzis et al. [20]; Liu et al. [21]).

El proceso de ejecución de la programación es el siguiente. Primero, se genera un cronograma optimizado, y luego las tareas son enviadas a distintos proveedores para su ejecución. Durante el proceso de ejecución, los recursos y

el estado de la tarea son monitoreados en tiempo real. En algunos casos es necesario un control remoto sobre los recursos desde la plataforma de la nube (Wang et al. [22]); Adamson et al. [23]). Durante el proceso de programación, las empresas que realizan las distintas tareas de una misma tarea, interactúan y se comunican entre ellas para asegurar una ejecución sin problemas.

4. Entrega del producto: Luego de completada la tarea, los recursos asociados a esta son liberados, y el producto resultante (por ejemplo: partes, componentes, o productos finales) es entregado a los consumidores.

5. Evaluación del servicio: Luego de que el cliente recibe el resultado de la ejecución de la tarea, tienen la chance de evaluar el servicio que utilizaron (Feng et al. [24]). Los resultados de la evaluación reflejan el grado general de satisfacción respecto a los resultados, y puede proporcionar una referencia importante para que los consumidores posteriores seleccionen servicios.

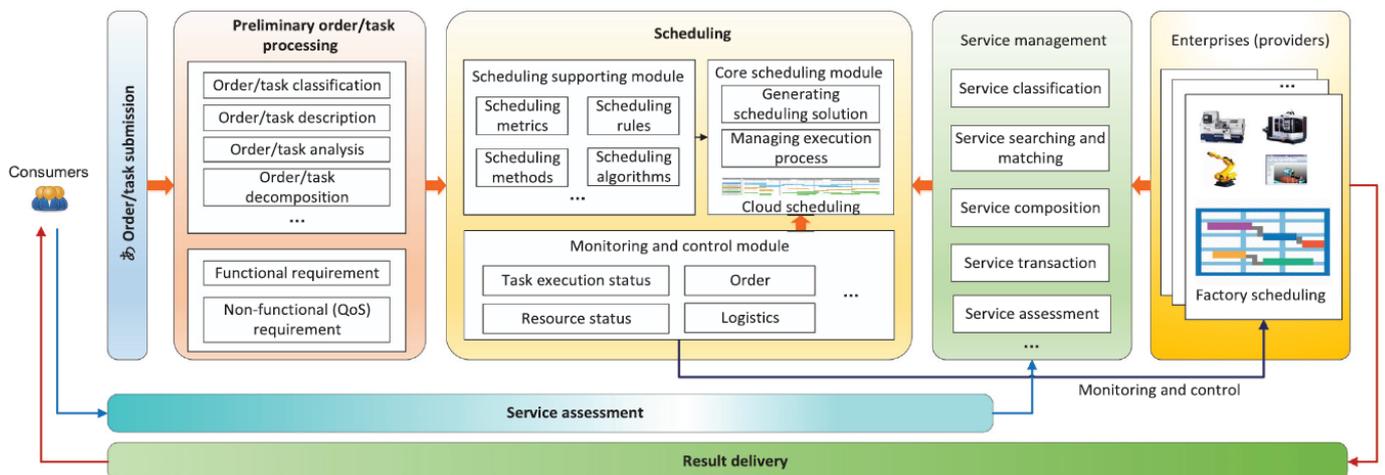


Figura 3: Procedimiento de programación en cloud manufacturing. Fuente: Liu et al. [9]

6. Procesos Fundamentales para la Obtención de un Scheduling eficaz y eficiente

La programación de la fabricación en la nube se puede entender de manera limitada o general. Al tomar una visión general, en un proceso complejo que considera muchas actividades independientes, se obtienen planes de fabricación más efectivos y factibles. Esto se debe a que, si nos enfocamos solo en el scheduling como proceso independiente del resto y descuidamos otros procesos y actividades, el objetivo real de scheduling en CMfg no puede ser alcanzado.

Por ejemplo, un scheduling sin descomposición de tareas no puede garantizar la generación de una planificación práctica ya que el proceso de descomposición es fundamental para la generación de una planificación eficiente.

Teniendo en cuenta la importancia de tener una visión amplia dentro de la temática, se decide organizar la bibliografía según 4 procesos fundamentales dentro del Scheduling en la nube:

1. Task Decomposition (descomposición de tareas)
2. Resource, Service & Matching, Discovery, Selection (emparejamiento, descubrimiento y selección de tareas o servicios)
3. Configuration, Allocation or Composition (configuración, asignación o composición).
4. Scheduling (programación de tareas y servicios).

6.1. Task decomposition

En el inicio del proceso el cliente ingresa al sistema una orden, siendo ésta la tarea principal a realizar. Estas tareas pueden ser simples o complejas, dependiendo de si se trata de una tarea que requiere un único servicio o múltiples servicios para su ejecución. Además, el ingreso de tareas puede ser único o múltiple, pero en CMfg es más realista que las tareas sean múltiples, ya que hay muchos clientes solicitando órdenes y estos pueden colocar más de una. Una ilustración de lo anterior se puede observar en la [Figura 4](#).

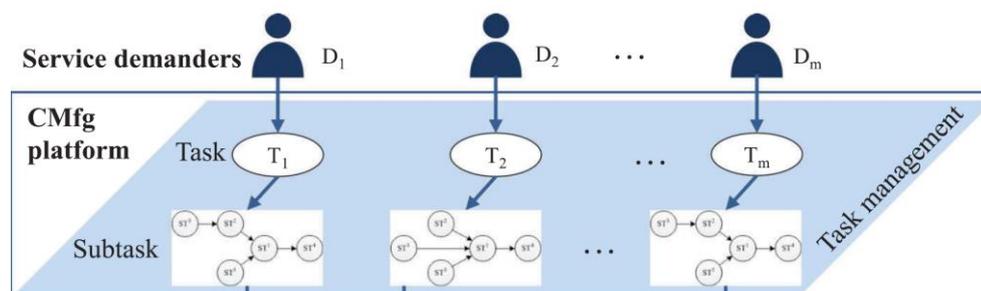


Figura 4: Grafo de subtareas. Fuente: Zhou et al. [25].

Para tratar las tareas complejas y facilitar el correcto desarrollo de las mismas, es de suma importancia dividir las tareas en sub-tareas.

Contar con las subtareas al scheduling en CMfg, pudiendo ser cada una de dichas subtareas desarrolladas por los distintos proveedores de servicio disponibles en la nube.

Sin embargo, el llevar a cabo esta descomposición no es un tema sencillo, sino que es un tema desafiante ya que se debe considerar el estado de los servicios y las precedencias de estas. Aun siendo importante y complejo, no son muchos los trabajos desarrollados tratando esta temática.

En Feng Li et al. [26] se resuelve un problema de múltiples tareas donde, entre otras cosas, se asume que las subtareas se pueden realizar en varios servicios, pero solo una a la vez. También considera que un conjunto de subtareas que pertenecen a la misma tarea puede tener un orden de precedencia, esto significa que una sub-tarea se puede realizar solo si se realizaron las anteriores. A su vez, estas precedencias no tienen por qué ser en orden secuencial, sino que puede ser en una estructura combinada y paralela. Esto quiere decir que las relaciones de precedencia son complicadas y varían de una tarea a otra.

En Yi et al. [27] se propone una red de tareas jerárquicas, con un enfoque de planificación automatizada dentro de inteligencia artificial. La descomposición de tareas se ve afectada, entre otros factores, por el estado del servicio, factores humanos, condiciones de carga y criterios subjetivos de los usuarios. Por lo tanto, para poder realizar una buena planificación se necesita una descomposición de tareas múltiples y una estrategia de control en el proceso de planificación para juzgar si la tarea puede seguir descomponiéndose.

6.2. Resource, Service & Matching, Discovery, Selection

Una vez que se dividen las tareas, se procede a determinar qué proveedores de servicios son adecuados para realizarlas. En sentido más estricto, se evalúa los diferentes requisitos funcionales y no funcionales del sistema para así decidir si un determinado proveedor de servicio lo puede cumplir.

El **emparejamiento de tareas con recursos o servicios** es un tema del cual se tiene un estudio exhaustivo a partir del cual se han desarrollado, y propuesto, distintos métodos y mecanismos. Dentro de los mismos, [9] menciona:

- Semantics-based hierarchical matching
- Hyper-network-based supply demand matching (Tao et al. [28])
- QoS-based two-sided matching

La primera de las tres investigaciones propone un servicio inteligente de búsqueda y emparejamiento basado en una estrategia de “bi-proceso”. En primer lugar, se filtran servicios de acuerdo a su tipo y status o cantidad de información para obtener un conjunto preliminar de servicios candidatos. A continuación, se hacen coincidir los servicios y los requisitos en función de su información tanto funcional como no funcional, obteniendo de esta manera servicios con alto grado de coincidencia.

Por su parte en Xiaoxue et al. [29] propone un marco de referencia para el emparejamiento de la oferta y la demanda. Se presenta una arquitectura de

almacenamiento para la información de fabricación que combina bases de datos relacionales y no relacionales para aumentar la eficiencia de las consultas de recursos. La base de datos relacional se usa principalmente para almacenar datos y gestionar la información de transacciones. De esta forma, toda la información de los recursos es almacenada en la base de datos relacional, que incluye información de: la estructura de los recursos, de la locación, del fabricante, de las funciones, de la calidad del servicio y de performance. Por otro lado, los datos en el modelo de recursos de bases de datos no relacionales, son extraídos de la base de datos relacional, y usada para realizar un descubrimiento, análisis y emparejamiento de recursos eficiente y preciso. Luego se propone un algoritmo de emparejamiento basado en el modelo de almacenamiento. El proceso de emparejamiento se divide en tres partes, las cuales son análisis de requisitos del cliente, emparejamiento de función y recomendación de servicios. Finalmente se evalúan los resultados en un caso de estudio.

En lo que refiere al **descubrimiento de recursos/servicios**, se trata de un proceso de búsqueda que consiste en hacer coincidir los mismos a tareas específicas. Dentro de los métodos propuestos para este proceso se encuentran:

- Ontology-based resource discovery (Kang et al. [30])
- Task-driven service proactive discovery (Zhang et al. [31])
- Agent-based service discovery (Guo et al. [32]).

En [31] se propone un mecanismo de descubrimiento proactivo del servicio CMfg orientado a tareas donde, los propios servicios son los que responden de manera proactiva a las tareas que ingresan al sistema. Propone un método de emparejamiento inteligente basado en la semántica que consiste en una biblioteca de productos y un módulo de emparejamiento de funciones.

Por su parte, la **selección del recurso o servicio** es un proceso que determina y selecciona el recurso o servicio que mejor se adecúe a la tarea en términos de requerimientos funcionales y no funcionales.

6.3. Configuration, Allocation or Composition

Este proceso consiste en la asignación de recursos de manufactura para planificar las diferentes tareas, buscando el rendimiento óptimo del sistema.

Desde una perspectiva general, la configuración del servicio incluye la asignación de servicios y su planificación.

La asignación de recursos/servicios incluye el proceso de composición de servicios, especialmente para la asignación de estos a tareas compuestas por una serie de subtareas.

La asignación de servicios ha sido uno de los mayores atractivos para los investigadores. Es importante aclarar que la diferencia entre el término scheduling y allocation radica en que la primera considera cambios dinámicos de recursos/servicios o tareas.

Zhou et al. [25], por ejemplo, trata la problemática asociada a la asignación de servicios a tareas de requerimientos individualizados en CMfg.

La **composición del servicio** se refiere al proceso de combinar y transformar múltiples servicios en servicios de valor agregado para cumplir una tarea o conjunto de tareas. El problema de composición de servicio es otro de los temas que han sido extensivamente estudiados en CMfg. La mayoría de los trabajos de investigación adoptan el QoS-aware method propuesto por Tao et al. [33].

6.4. Scheduling

La mayor parte de la investigación se centra en el scheduling de las tareas y recursos de manufactura.

En [3], artículo tomado como punto de partida en la elaboración del prototipo del modelo matemático desarrollado en esta tesis, propone un modelo de programación de enteros mixtos para resolver la optimización de la selección de servicios y el problema de scheduling optimizando el costo, el tiempo y la calidad. Para resolver esta función multiobjetivo, utilizan el método de la suma ponderada. Los costos y tiempos que consideran incluyen los de fabricación y de transporte. Para la calidad se toma en cuenta la tasa de aprobación de cada empresa proveedora de recursos de fabricación. En su modelo toman en cuenta las composiciones básicas de los procesos productivos, es decir, secuencial, en paralelo, en loop y selectivo. Para cada composición plantean una función objetivo, evaluando los criterios mencionados anteriormente. En la realidad las tareas suelen tener composiciones mixtas, por lo que es necesario plantear una función objetivo genérica. Los autores resuelven por transformar las tareas de composición mixta en una tarea secuencial como se muestra en la [Figura 5](#).

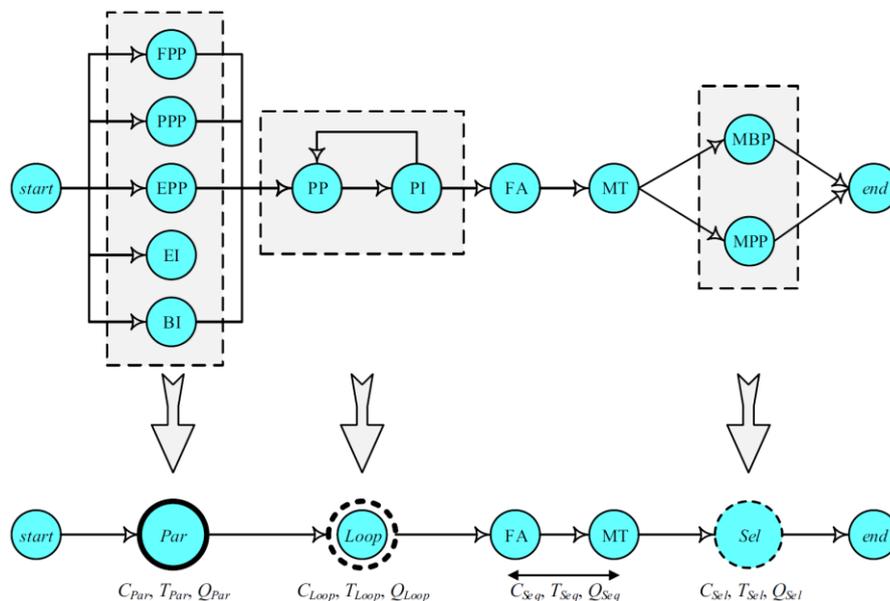


Figura 5: Transformación de tareas de composición mixta a unas tareas secuenciales. Fuente: Akbaripour et al. [3]

Otro aporte interesante de dichos autores es la incorporación de la optimización de ruteo en base a una red de transporte hub-and-spoke híbrida, la cual fueron los primeros en utilizarla. También se tiene en cuenta el período en que los servicios se encuentran

ocupados y no pueden ser seleccionados por el sistema de SSOS para realizar la tarea solicitada en tal período, el cual se establece de antemano. Lo mencionado le aporta más realismo al modelo desarrollado.

En [17] se propone un método de programación diverso de tareas, basadas en algoritmos genéticos. Se propuso GA basada en la codificación de matriz numérica real para tratar la asignación de recursos. Este método se utiliza para seleccionar los servicios óptimos y cumplir con los requisitos individualizados de los clientes. Para atender este problema se diseña cada tarea como si fuera un grafo dirigido por las subtareas, donde los nodos es donde se hacen las tareas y las uniones representa la logística. En este problema, además de los clásicos atributos de servicio como costo, tiempo y calidad, se considera el atributo logístico.

7. Revisión Sistemática de la Literatura

Se presenta una revisión sistemática de la literatura asociada a scheduling en cloud manufacturing cuyo objetivo es analizar y evidenciar el creciente interés de la comunidad científica en el tema.

Inicialmente se realizó una búsqueda de todos los trabajos realizados hasta la fecha. Esta búsqueda se llevó a cabo siguiendo una metodología sistemática, de modo que pueda ser verificada y repetida.

Las fechas de las publicaciones consideradas para el análisis pertenecen al período 2018-2020. Para los años previos, se utilizan los resultados obtenidos a partir de la revisión realizada por [9], la cual incluye trabajos desde el 2010 hasta principios del 2018. Este trabajo se toma como base para la generación de esta búsqueda y para el análisis presentado a continuación.

Aclaración: La fecha en la cual se realiza la búsqueda es el 6 de julio de 2020.

7.1. Metodología

Para poder realizar una revisión sistemática, se debe definir un proceso repetible y verificable. El flujo de proceso se puede observar en la [Figura 6](#), el cual consiste en los siguientes pasos:

- Definir criterios de clasificación de la literatura considerando bases de datos o colecciones sobre las que se realizará la búsqueda.
- Consolidación de los resultados obtenidos una vez realizadas las distintas búsquedas de acuerdo con los criterios mencionados en el punto anterior.
- Consolidación de los resultados obtenidos considerando las tres bases.
- Eliminación de duplicados indicando las veces que la publicación haya aparecido en las distintas búsquedas.
- Lectura de Títulos y Abstracts para clasificación inicial de las publicaciones de acuerdo a la clasificación definida en el paso 1.
- Eliminación de publicaciones NO relacionadas al tema tratado.
- Lectura profunda de aquellas publicaciones que generaban dudas en cuanto a su relación con el tema para luego clasificarla o descartarla.

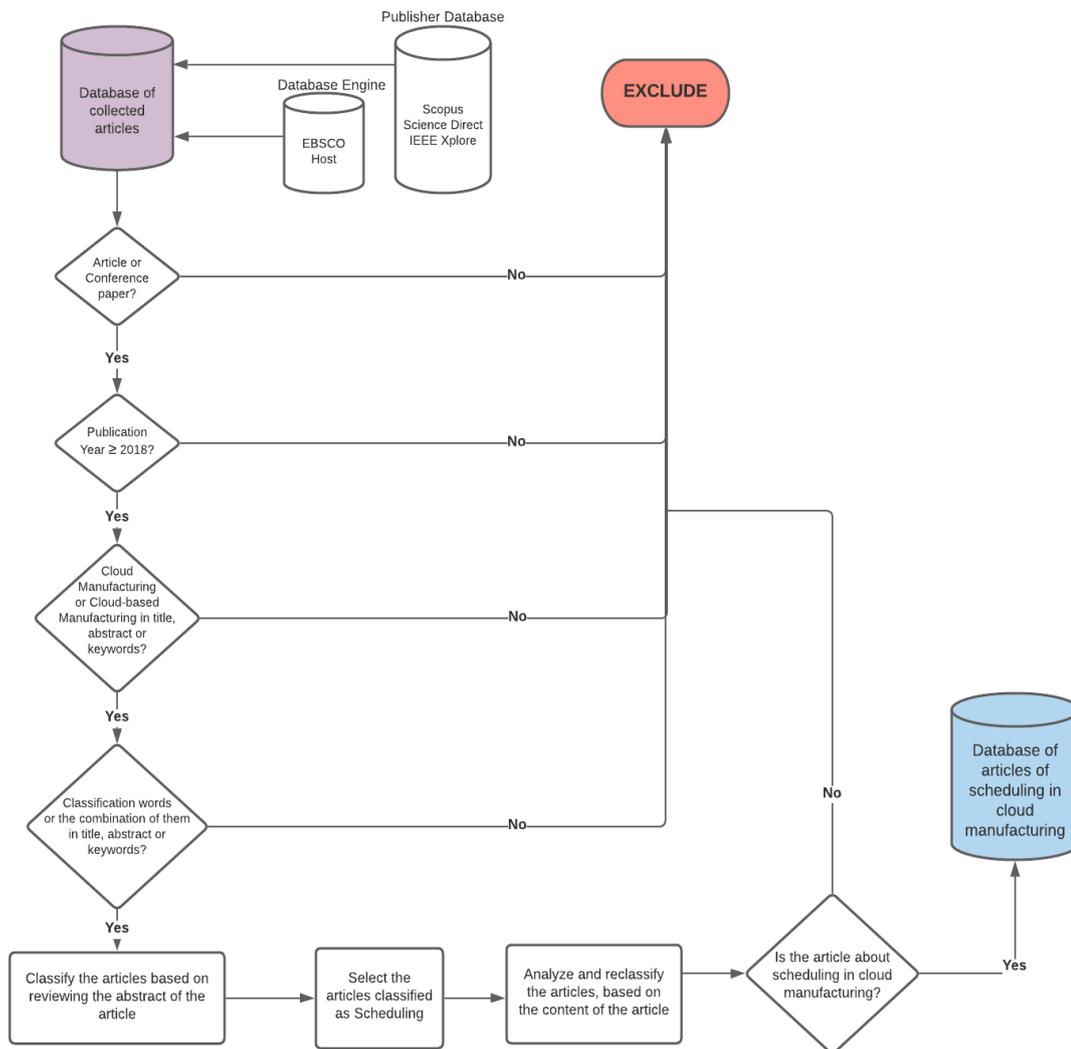


Figura 6: Flujo de proceso aplicado en la búsqueda sistemática.

7.1.1. Criterios de clasificación de la literatura

Para la clasificación de la literatura, se utilizan los procesos fundamentales para la obtención de un scheduling eficaz y eficiente mencionados en el punto 5 del presente informe.

Las misma respeta lo definido en el trabajo considerado como base, definiendo las siguientes categorías (procesos fundamentales):

- Task decomposition
- Resource, Service & Matching, Discovery, Selection
- Resource, Service & Configuration, Composition, Allocation
- Scheduling

Será a partir de dichos procesos que nosotros clasificaremos nuestras búsquedas. Para localizar estudios relevantes se definió un conjunto de reglas para enmarcar la literatura que será tomada en cuenta. Las mismas son detalladas a continuación:

- La búsqueda se centró en artículos e informes de conferencias.

- Las colecciones o bases de datos electrónicas en las cuales se realizaron las distintas búsquedas fueron:
 - Scopus
 - IEEE
 - Science Direct
- Las búsquedas en cada colección se realizaron en cuatro fases, una por cada clasificación.
- Para todas las búsquedas se exigió la existencia de las palabras cloud manufacturing o cloud-based manufacturing en el título, resumen o palabras clave.
- A su vez, se exige la presencia de las palabras, o combinación de palabras, que componen cada una de las clasificaciones utilizadas, en el título, resumen o palabras clave. Es decir, en total se realizan 12 búsquedas, una por clasificación/colección.

Los resultados de la búsqueda en Scopus, IEEE y Science Direct se puede observar en la [Tabla 1](#), [Tabla 2](#) y [Tabla 3](#) respectivamente(considerar que cada línea corresponde a una búsqueda):

| COLECCIÓN SCOPUS | Cantidad |
|--|-----------------|
| Task Decomposition | 4 |
| Discovery, Matching and Selection | 104 |
| Configuration, Allocation or Composition | 114 |
| Scheduling | 83 |
| Suma total | 305 |

Tabla 1: Resultados colección Scopus

| COLECCIÓN IEEE | Cantidad |
|---|-----------------|
| Task Decomposition | 1 |
| Matching, Discovery and Selection | 13 |
| Configuration, Allocation and Composition | 25 |
| Scheduling | 15 |
| Suma total | 54 |

Tabla 2: Resultados colección IEEE

| COLECCIÓN SCIENCE DIRECT | Cantidad |
|--|-----------------|
| Task Decomposition | 3 |
| Discovery, Matching and Selection | 32 |
| Configuration, Allocation or Composition | 34 |
| Scheduling | 30 |
| Suma total | 99 |

Tabla 3: Resultados colección Science Direct

7.1.2. Consolidación de los Resultados Obtenidos

Una vez finalizada esta búsqueda se obtiene un conjunto inicial de estudios, donde algunos de los trabajos pueden haberse obtenido en múltiples clasificaciones y/o colecciones.

A raíz de esto, se procede a la agrupación de los resultados obtenidos en cada búsqueda para cada colección y, una vez obtenido el consolidado por colección, se procede a obtener el consolidado final en el que se indica la búsqueda calificación-colección en la que apareció cada colección.

De acuerdo con las tablas incluidas en el subcapítulo anterior, se tienen 305 publicaciones que se obtuvieron de las búsquedas realizadas en Scopus, 54 que se obtuvieron de búsquedas realizadas en IEEE y 99 que se obtuvieron de búsquedas realizadas en Science Direct.

Al realizar el cruce de los tres consolidados, se llega a una cifra final de 277 publicaciones (artículos o informes de conferencia). A modo informativo, 130 de esos 277 trabajos (casi el 47%) aparecen en más de una búsqueda.

7.1.3. Clasificación inicial en función del título y abstract

Tal como fue mencionado anteriormente, el consolidado presentaba una serie de trabajos que se encontraban con más de una clasificación.

Considerando esta mención, y como primera etapa de clasificación se procedió a, en función del título y abstract del paper o conference paper (extraído de las colecciones en su búsqueda correspondiente), llevar a cabo una instancia de clasificación de los resultados obtenidos.

En esta instancia se busca ser lo más objetivo posible, clasificando desestimando, en cierto modo, en qué búsqueda fue en la que se encontró la publicación. Con esto último, hacemos referencia a que si al realizar la lectura consideramos que lo más apropiado es clasificar al trabajo como “CAC” (Configuration, Allocation or Composition) lo clasificamos como tal, independientemente que el trabajo haya aparecido en una búsqueda de “Resource, Service & Matching, Discovery, Selection”.

Es a partir de esta instancia que se comienzan a desestimar y/o eliminar aquellas publicaciones para las cuales se considera que no hay asociación con el tema tratado a lo largo de este proyecto.

Por su parte, aquellos trabajos para los cuales no se tenía total certeza de su inclusión o no en el análisis o para los cuales no era posible asignar una clasificación específica a partir de su título o abstract fueron marcados para, posteriormente, profundizar en los mismos buscando asignarle una clasificación.

Por último, y acorde al objetivo planteado inicialmente de mostrar el creciente interés de la comunidad científica en el tema, se dividen los trabajos en función de su año de publicación, dato que también se extrajo de las distintas búsquedas.

Los resultados de esta etapa se pueden ver en la [Tabla 4](#):

| Cantidad de Publicaciones | Año | | |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Clasificación | 2018 | 2019 | 2020 |
| CAC | 27 | 31 | 18 |
| MDS | 13 | 23 | 10 |
| SCH | 16 | 33 | 10 |
| TD | 1 | 2 | |
| Suma total | 57 | 89 | 38 |

Tabla 4: Resultados consolidado de las colecciones

Además de los resultados mostrados en la tabla subyacente, cabe destacar que 69 de los papers fueron desestimados y 24 fueron clasificados como “DUDA” para su posterior profundización.

7.1.4. Clasificación final

Una vez finalizada la clasificación inicial de las publicaciones se procede a leer aquellos papers para los cuales no se pudo definir si debían ser considerados o no. Aquellos que se entiende deben ser considerados, son clasificados según los criterios detallados inicialmente.

En esta instancia, y de acuerdo a los resultados mostrados en el subcapítulo 6.1.3 se trabaja sobre un total de 24 trabajos previamente clasificados como “DUDA”.

De esta segunda clasificación se desprende que, del total de 277 publicaciones:

- 3 corresponden a Task Decomposition
- 47 corresponden a Discovery, Matching and Selection
- 79 corresponden a Configuration, Allocation and Composition
- 60 corresponden a Scheduling

Por su parte, un total de 88 publicaciones fueron descartadas debido a su falta de vinculación con el tema tratado.

A modo estadístico, se muestra en la [Figura 7](#) el resultado del crecimiento en el número de publicaciones realizadas año a año considerando, en este caso, los resultados de la búsqueda realizada por [9].

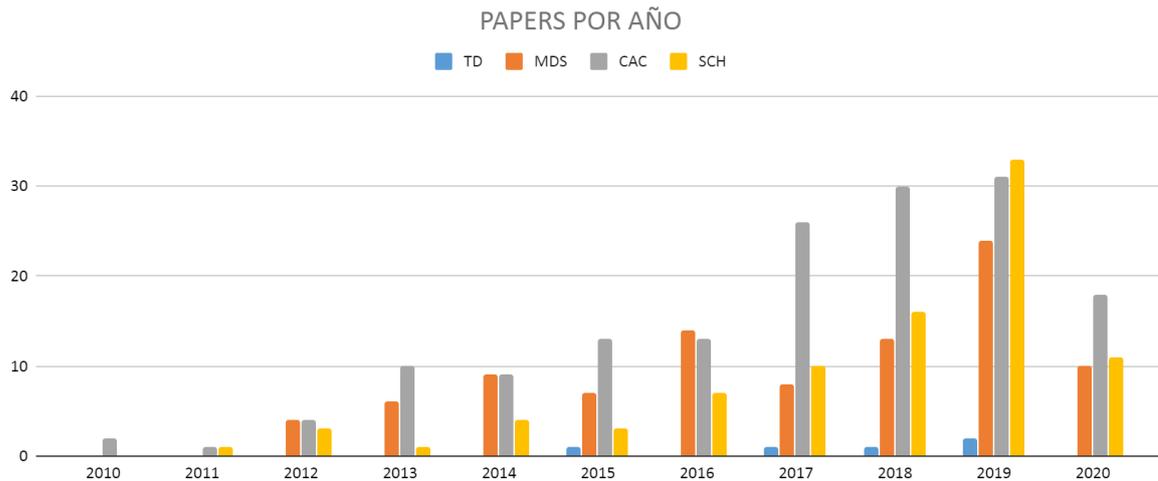


Figura 7: Resultado estadístico de publicación por año según su clasificación.

7.2. Análisis estadístico

Esta sección proporciona un análisis estadístico de los artículos existentes sobre los temas de investigación mencionados anteriormente (Task decomposition, Resource or Service & Matching, Discovery and Selection, Resource or Service & Configuration, Allocation and Composition, Scheduling).

Las estadísticas presentadas a continuación se basan en datos obtenidos de las distintas bases mencionadas previamente en la fecha 6 de julio de 2020. Nuestra búsqueda y análisis de literatura encontró un total de 277 artículos.

Una vez ejecutada la metodología descrita en el punto 6.1, ese número de artículos se redujo a 189, número que resulta de las 184 publicaciones clasificadas en el punto 6.1.3 y de los 5 agregados a partir de la profundización mencionada en el punto 6.1.4.

Procedemos ahora a presentar, en la [Tabla 5](#), el número de artículos publicados sobre cada uno de los distintos temas (clasificaciones) a lo largo de los años 2010-2020. Considerar que, como ya mencionó previamente, la estadística correspondiente a los años 2010-2018 es extraída del artículo [9].

| | TD | MDS | CAC | SCH | TOTAL |
|------|----|-----|-----|-----|-------|
| 2010 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| 2011 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| 2012 | 0 | 4 | 4 | 3 | 11 |
| 2013 | 0 | 6 | 10 | 1 | 17 |
| 2014 | 0 | 9 | 9 | 4 | 22 |
| 2015 | 1 | 7 | 13 | 3 | 24 |
| 2016 | 0 | 14 | 13 | 7 | 34 |
| 2017 | 1 | 8 | 26 | 10 | 45 |
| 2018 | 1 | 13 | 30 | 16 | 60 |
| 2019 | 2 | 24 | 31 | 33 | 90 |
| 2020 | 0 | 10 | 18 | 11 | 39 |

Tabla 5: Evolución papers por año según la clasificación desde el 2010 - 2020.

A continuación presentamos en la [Figura 8](#), [Figura 9](#), [Figura 10](#) y [Figura 11](#), el resultado de las distintas búsquedas, por tema, de manera gráfica. Además se muestra en la [Figura 12](#) se muestra el total de trabajos encontrados, teniendo en cuenta todas las clasificaciones.

Task Decomposition

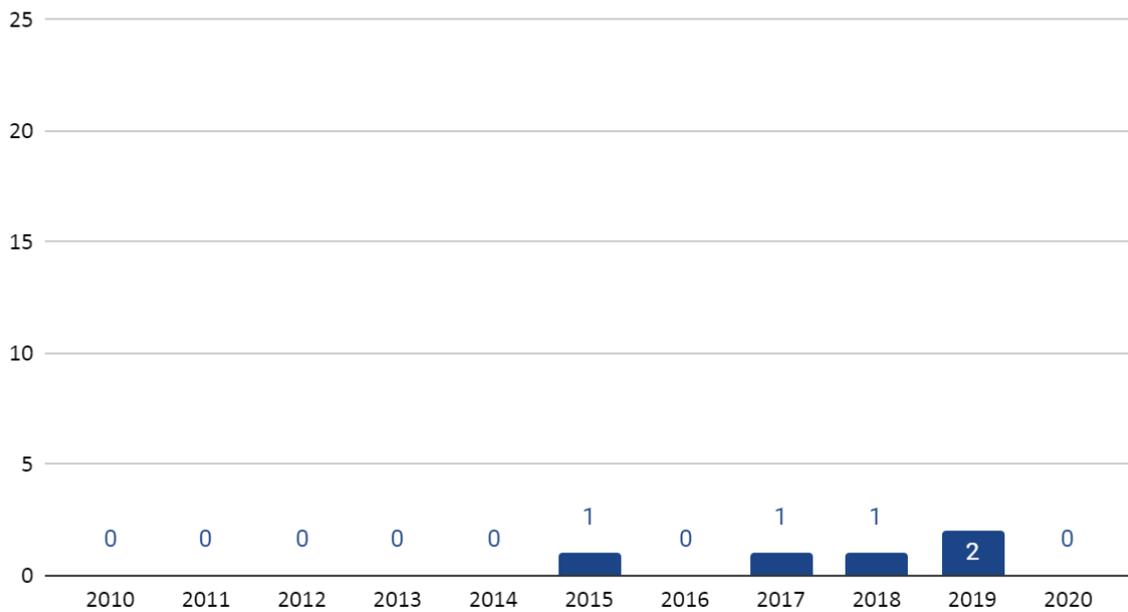


Figura 8: Cantidad de trabajos sobre Task Decomposition desde el 2010 - 2020

Discovery, matching and Selection

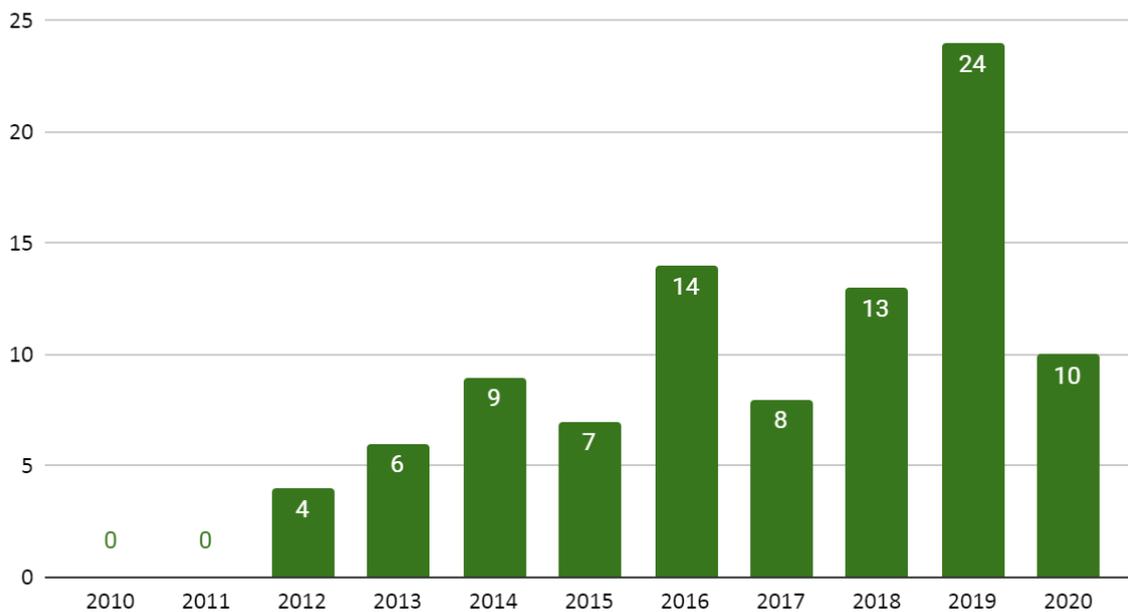


Figura 9: Cantidad de trabajos sobre Discovery, Matching and Selection desde el 2010-2020

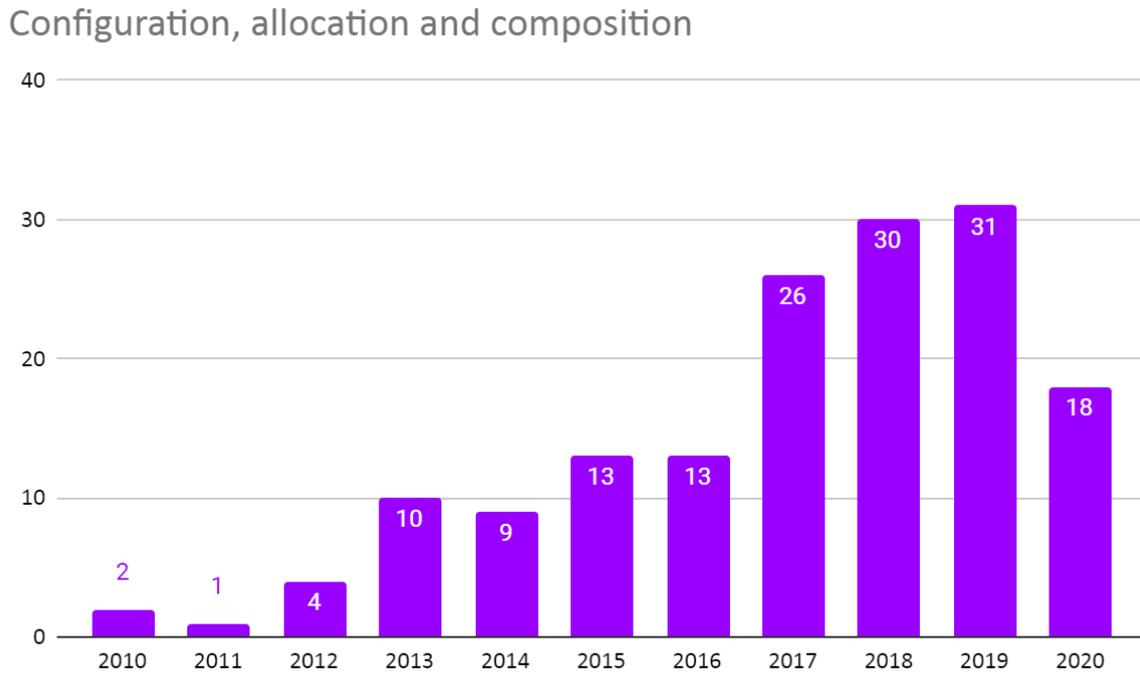


Figura 10: Cantidad de trabajos sobre Configuration, Allocation and Composition desde 2010-2020

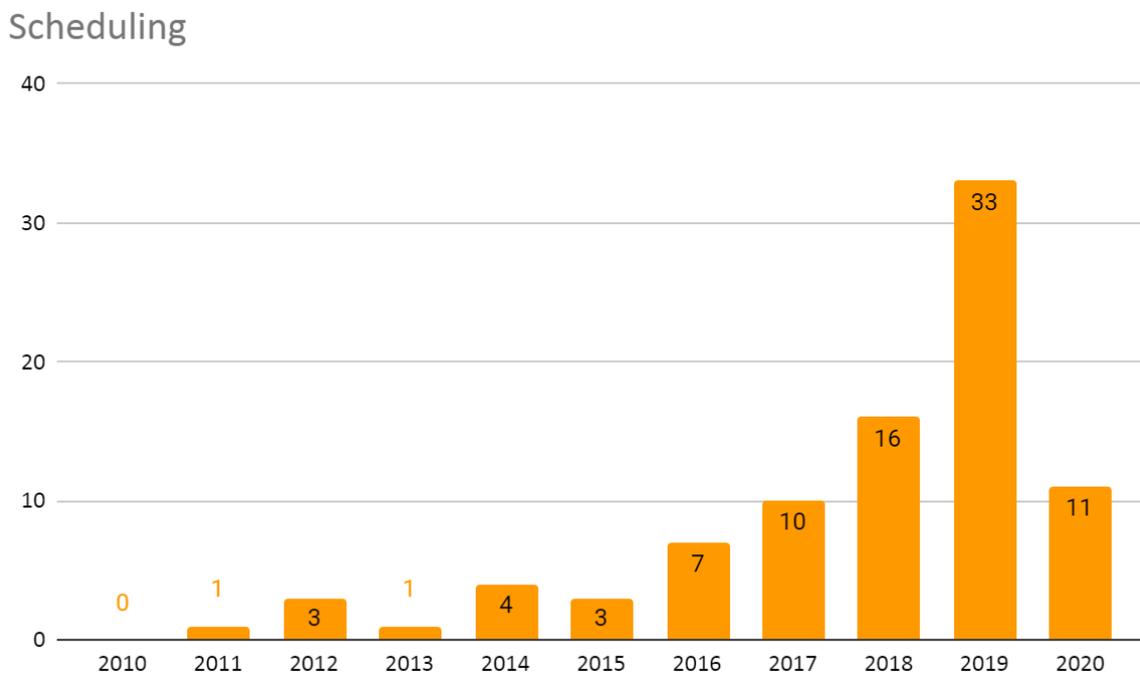


Figura 11: Cantidad de trabajos sobre Scheduling desde 2010-2020

Total de Papers

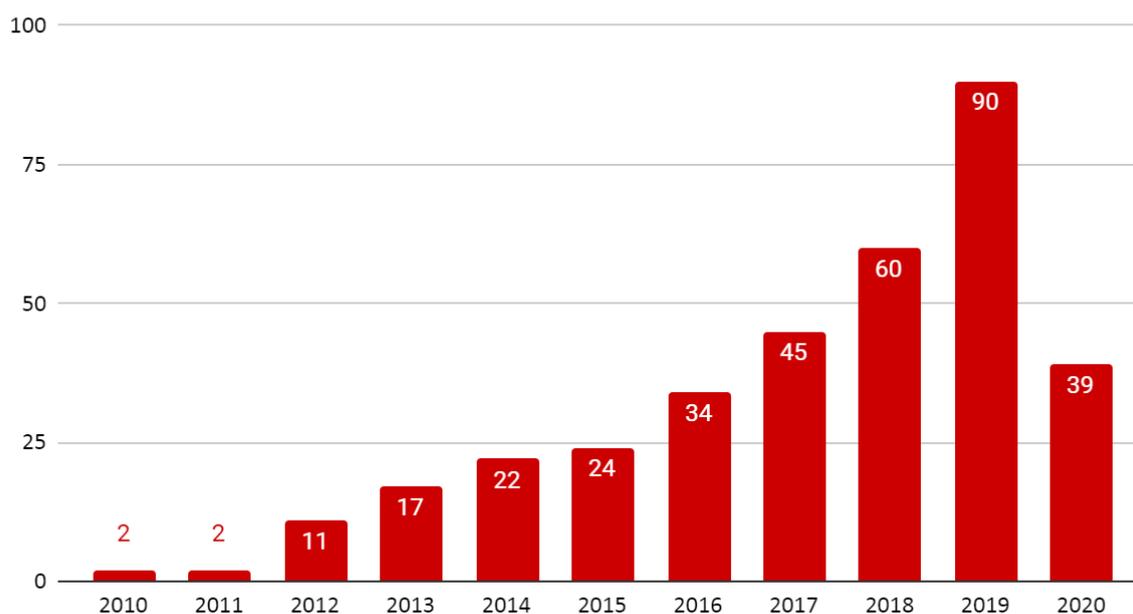


Figura 12: Resumen trabajos vinculados a Cloud Manufacturing desde 2010-2020

Indudablemente la investigación y desarrollo mundial del tema Cloud Manufacturing aún carece de profundización en el proceso de descomposición de tareas en subtareas, siendo este, un tema requisito previo fundamental para la correcta programación de la fabricación en la nube.

Por su parte, la atención de los investigadores en temas asociados a la configuración, asignación o composición de recursos o servicios y scheduling se ha incrementado de manera sostenida en los últimos años. Cabe destacar el gran aumento en las investigaciones asociadas a este último punto, aumentando en más de un 100% del año 2018 al 2019 (de 16 publicaciones a 33).

En lo que refiere a descubrimiento, emparejamiento y selección, la investigación muestra un pico importante en el año 2019 en el cual se presenta un incremento del 77% con respecto al año anterior.

7.3. Análisis Scheduling

Una vez clasificadas la totalidad de las publicaciones se procede a hacer especial énfasis en aquellas clasificadas, inicialmente, como Scheduling (en total 61 publicaciones).

Por su parte, y a modo de incrementar el número de publicaciones consideradas para el posterior análisis, se acuerda la idea de definir un criterio para poder incluir aquellos trabajos que, aun habiendo sido clasificados como Resource, Service & Configuration, Allocation, Composition, presenten modelos vinculados a la planificación de tareas.

Como criterio se define que aquellas publicaciones que hayan aparecido en búsquedas de Scheduling en alguna de las tres colecciones mencionadas previamente, es decir, que contengan la palabra “scheduling” en título, abstract o palabras claves, serán consideradas en esta etapa del análisis. A partir de este criterio se incluyen, para la posterior profundización un total de 6 publicaciones.

En resumen, para esta etapa de la búsqueda se consideraron un total de 67 publicaciones.

Una vez concluida la búsqueda, realizamos la lectura de los trabajos dentro de la clasificación correspondientes.

El objetivo de esta etapa de la revisión era abocarnos en la lectura de las distintas publicaciones consideradas buscando obtener, para cada uno de los artículos, nociones asociadas al problema central sobre el cual se realiza la investigación.

Aclaración: Para la búsqueda del texto de cada una de las publicaciones se utilizó la plataforma Sci-Hub. Las búsquedas se realizaron entre el 8 y 22 de agosto de 2020.

En esta línea se profundiza, a su vez, en el método de resolución utilizado en cada investigación con el objetivo final de detectar posibles tendencias que muestren la perspectiva de la comunidad científica sobre el tema tratado.

Indudablemente, en esta nueva etapa surgieron otros artículos o informes de conferencias que fueron descartadas por no estar 100% vinculadas al Scheduling en Cloud Manufacturing (7 artículos).

Por su parte, se descartaron, por obvias razones, aquellas publicaciones realizadas en idioma Chino (3 artículos) y aquellas que no se pudieron encontrar en los distintos buscadores y de las cuales no era posible identificar el problema propuesto (3 artículos).

Sin embargo, para estos últimos, sí fue posible identificar el método utilizado para la resolución del problema planteado, por lo que fueron considerados para el análisis que se muestra a continuación.

Al final de cuentas, se realiza el análisis de un total de 57 trabajos entre los que se incluyen aquellos que fueron encontrados en la plataforma mencionada y aquellos cuyo problema y/o método de resolución se puede identificar a partir de la lectura del abstract.

Dentro de dichas publicaciones, 4 no presentan un método de resolución sino que se enfocan en otro tipo de características asociadas al scheduling.

En cuanto a los resultados derivados del análisis de estas publicaciones se puede observar que, en la gran mayoría de los casos, se tratan problemas multi objetivo.

La razón principal de esto es debido a la necesidad imperiosa de considerar distintas variables a la hora de asignar tareas, servicios y/o recursos en los distintos proveedores. Dentro de dichas variables se destacan, por ejemplo, los costos, tiempos, distancias y calidad.

Cabe destacar que, dentro de la inmensa mayoría de trabajos multi objetivo, Zhang et al. [34]) presenta un modelo con resolución mono-objetivo.

7.3.1. Métodos de Resolución

Tal como fue mencionado anteriormente, se realizó una búsqueda bibliográfica sistemática en la cual se hizo especial énfasis sobre problemas de programación en entornos de Cloud Manufacturing.

Dado que el objetivo final de esta revisión es analizar la evolución del estudio de Scheduling en problemas CMfg después [9], es interesante analizar qué métodos y enfoques se están utilizando para abordar el estudio de estos temas. Por tal motivo, proponemos la revisión clasificando los trabajos en función del enfoque y/o método de resolución utilizado por los autores para abordar el problema.

Métodos Exactos

En esta primera etapa de la revisión, revisamos todos los artículos encontrados que han utilizado métodos de resolución exactos.

El primer trabajo que encontramos dentro de este grupo es Delaram et al. [2]. En este trabajo, los autores parten de la analogía que existe con el horario de tareas en la computación en la nube, pero incorporando la condición de logística propia de CMfg. En el trabajo se propone un modelo lineal de enteros mixtos (MIP), donde se busca minimizar los costos de logística y producción. Resuelven algunos casos ilustrativos utilizando LINGO.

En consecuencia, Suma y Murugesan [35] también abordan un problema a través del modelado MIP, pero en este caso el problema optimiza, además de los costos de logística y producción, tanto los tiempos de producción como los de transferencia. Para resolver el problema, utilizan un enfoque Min-Max.

En Vahedi-Nouri et al. [36], otro problema multiobjetivo se aborda utilizando un método de ϵ -constrain. La particularidad del problema aquí estudiado es que permite el rechazo o aceptación de los puestos de trabajo por parte de los proveedores de servicios. Además, los precios y cantidades producidas se establecen con el fin de igualar las ganancias entre todos los productores asociados a la plataforma Cloud Manufacturing.

Por otro lado, para resolver el problema de asignar tareas a los productores, y luego hacer el cronograma en [34] se propone un proceso por etapas. En una primera etapa se planifica el proceso de producción, ya sea por un sistema multi-agente o por simple proximidad, y en una segunda etapa se realiza la programación. En este caso, la programación se realiza utilizando la programación de restricciones como método de resolución.

En [3] se aborda un problema que considera ventanas de tiempo en la disponibilidad de recursos productivos. Para solucionar el problema del transporte y producción de los pedidos de los clientes, los autores proponen un modelo MIP. Este modelo busca minimizar los costos de producción y transporte, así como los tiempos de producción y transporte, al mismo tiempo que busca maximizar la calidad del servicio utilizado para la producción. Resuelven el problema utilizando CPLEX.

Otro enfoque es considerar diferentes niveles de decisión donde la decisión de un jugador está vinculada a la decisión de otro. Wang et al. [37] es un ejemplo de este enfoque. En su trabajo proponen una estructura multi-agente, donde los prestadores de servicios (agentes a corto plazo) optimizan su desempeño ligados a un agente jerárquico con prioridad con objetivos a largo plazo. Sin embargo, el agente jerárquico puede optimizar su medida de desempeño siempre que la función objetivo del resto de agentes de corto plazo ceda dentro de ciertos límites.

Los autores analizan diferentes problemas y configuraciones del problema de fabricación en la nube, así como también analizan diferentes funciones objetivo (tiempo total de finalización y número ponderado de trabajos tardíos). Por otro lado, los autores estudian la complejidad de los diferentes problemas propuestos, y en los posibles casos proponen métodos de resolución.

Teoría de Juegos

Otro enfoque ampliamente utilizado cuando se trata de problemas de toma de decisiones en CMfg es el de la teoría de juegos. La principal ventaja de este enfoque es que permite descentralizar el proceso de toma de decisiones, de modo que clientes y proveedores de recursos productivos coordinen directamente su actividad.

Como primer ejemplo de este enfoque, encontramos a Liu et al. [38], aquí el sistema se modela como un sistema multi-agente, y se propone que los diferentes agentes negocien y resuelvan los problemas de decisión involucrados en CMfg. Para ello, en primer lugar, los pedidos de los clientes deben desglosarse en subtareas para poder realizar el correspondiente emparejamiento entre subtareas y recursos productivos.

Mientras que en Xiao et al. [39], se plantea un problema descentralizado pero contemplando la perspectiva del cliente. Para ello, el cliente establece sus pagos buscando minimizar los tiempos totales de producción, los costos totales de producción y mejorar la confiabilidad. Para encontrar los equilibrios de Nash, se utiliza un algoritmo de optimización basado en biogeografía.

En Chen et al. [40], se proponen juegos cooperativos, donde los clientes buscan obtener recursos para producir sus pedidos. Inicialmente, la asignación de clientes a recursos se realiza de forma centralizada, y luego, en una segunda etapa, se proponen juegos colaborativos donde los clientes pueden mejorar la asignación inicial. Los autores demuestran que este problema es NP-duro. Finalmente, los autores proponen algoritmos de programación dinámica para resolver algunos de los casos problemáticos.

Otro tipo de problema que se puede abordar con la teoría de juegos es cuando la información es incompleta, como ocurre en Liu et al. [41]. En este trabajo, los autores proponen un mecanismo de decisión basado en una doble subasta. Estas subastas se llevan a cabo entre el solicitante de servicios (cliente) y el proveedor de servicios (productor). El mecanismo asegura que los servicios finalmente asignados cumplan con las preferencias de calidad, tiempo y costo definidas por los clientes.

Otro enfoque para abordar el problema es considerar un modelo de juego de bienes públicos no cooperativo como en Bai et al. [7]. Este enfoque permite converger hacia un horario óptimo de manera más eficiente que otros métodos, como GA. Otra estrategia es considerar licitaciones como en Liu et al. [5]. El objetivo de este trabajo es maximizar el beneficio general de todos los participantes, y al descomponer las tareas de

producción en subtareas, también se aplica el método de licitación. Los resultados de los autores permiten garantizar que el enfoque propuesto resuelva el problema de manera eficiente, así como garantizar la confianza y la equidad entre los participantes.

Meta-heurística y algoritmos evolutivos

Los enfoques basados en metaheurísticas y algoritmos evolutivos son, posiblemente, uno de los métodos más utilizados para resolver problemas de Scheduling [10], y en el caso de CMfg [9] no es la excepción.

Como primer caso en nuestra revisión de la literatura, encontramos a Zhou et al. [42]. En este trabajo, los autores abordan un sistema de fabricación aditiva (impresión 3D) que funciona en modo CMfg. De esta manera, un gran conjunto de proveedores de servicios de impresión distribuidos geográficamente se puede nutrir con la plataforma CMfg. Los autores proponen un enfoque basado en un modelo de transacción, que busca emparejar las especificaciones del cliente (requisitos de material, precisión, costos, calidad, etc.) con las capacidades de los proveedores. Luego, para resolver la programación de operaciones, se diseña un modelo de programación que busca optimizar el tiempo de entrega mediante GA.

En Simeone et al. [43] se aborda un problema de corte de chapa que coordina su acción a través de CMfg. El estudio se centra en asociar proveedores y clientes de tal forma que el uso de los recursos sea óptimo (o cuasi óptimo).

Otro ejemplo de fabricación de chapa se encuentra en Helo et al. [44]. En este trabajo, los autores abordan un problema de programación para varios proveedores de servicios distribuidos geográficamente, resolviendo el problema de manera centralizada. Como resultado de este enfoque centralizado, la plataforma CMfg ofrece programación como servicio. Para abordar el problema de optimización se utiliza un GA.

Otro ejemplo de metaheurística aplicada a la programación en CMfg es Suma y Murugesan [45], donde se propone un algoritmo inmunológico artificial. En este problema, los autores buscan minimizar los costos y la carga de trabajo de cada uno de los proveedores de servicios. Los proveedores tienen la particularidad de estar robotizados.

Por otro lado, [17] presentan un modelo para problemas CMfg con tareas altamente personalizadas. El modelado se basa en un gráfico dirigido que permite asignar y secuenciar tareas de tal forma que se ajusten a las preferencias del cliente. Para solucionar el problema de forma óptima, se propone un GA.

En Yuan et al. [46] GA también se usa, pero combinado con ACO para un problema de programación dinámica en CMfg. Para resolver el problema de asignación a cada proveedor de servicios se analizan varias métricas: tiempo (de entrega), costo, calidad y capacidad. Este último criterio de capacidad es un indicador que resume información sobre la capacidad general del proveedor, considerando porcentajes de desperdicio, tasa de fallas y capacidad de colaboración, entre otros. Otra forma de seleccionar con precisión proveedores para las tareas de los clientes es incorporar las preferencias del cliente en el proceso de decisión.

En He et al. [47], para hacer una buena selección de proveedores, lo que se propone es un método lingüístico que permita transmitir las preferencias de los clientes en cuanto

a: costos, tiempo, calidad y medio ambiente. De esta forma, cuando se optimiza el proceso de programación de forma multiobjetivo, cada objetivo (coste, tiempo, calidad y medioambiental) tendrá un enfoque y ponderación diferente, atendiendo a las preferencias del cliente. Para resolver el problema de optimización, los autores desarrollaron un GA.

En Ghomi et al. [48], el problema de asignación y programación se aborda también considerando un problema multiobjetivo. Aunque en este caso, además de buscar minimizar costos y tiempos de producción, también busca minimizar la diferencia en la carga de trabajo entre los diferentes proveedores. Los autores proponen una formulación matemática del problema, y finalmente terminan resolviéndolo con un AG. Un enfoque que permite convertir un problema multiobjetivo en uno de un solo objetivo es el AHP (Analytical Hierarchy Process).

Este enfoque fue aprovechado por Hu et al. [49] para agrupar cinco criterios diferentes a la hora de resolver la programación. Los cinco criterios considerados son: carga de trabajo, eficiencia, riqueza de recursos, confiabilidad y capacidad de IoT. En cuanto a la riqueza de recursos, lo que analizan los autores es la cantidad de operaciones diferentes que puede realizar un mismo proveedor. Y en la capacidad de IoT, los autores asocian la capacidad del proveedor entre su proceso logístico y la capacidad de informarlo. Estos cinco objetivos se ponderan de acuerdo con AHP y luego se optimizan mediante un algoritmo de optimización del caos.

Otro trabajo donde se explota AHP es Zhang et al. [50]. Aunque aquí el método se extiende a una variante difusa del problema de programación en CMfg. Los objetivos contemplados en este trabajo fueron el tiempo de servicio, el costo, la calidad y el uso del servicio. Para optimizar este problema se utilizó un algoritmo Firefly.

Otro trabajo que consideró una versión difusa fue Zhang et al. [51]. Un detalle interesante de este trabajo, es que el problema se considera “multiperspectiva”, es decir, busca resolver conflictos de interés entre clientes, proveedores de servicios y propietarios de plataformas CMfg. Para resolver el problema, los autores utilizan el peso de entropía difusa intuicionista valorado en intervalos (IVIFEW) y desarrollan un GA que optimiza este problema.

Una característica distintiva de CMfg es que el entorno de fabricación es muy dinámico, donde los pedidos de los clientes y las disponibilidades de los clientes varían rápidamente. Para afrontar este dinamismo, Elgendy et al. [52] proponen un GA modificado que les permita resolver el problema de manera eficiente. En Du et al. [53], se abordó un problema multiobjetivo que buscaba minimizar la producción, el costo y el equilibrio de la carga de trabajo. Para resolver el problema multiobjetivo, los autores proponen un método híbrido basado en Cat Swarm Optimization (CSO) y el algoritmo Firefly.

En Zhang et al. [54] busca resolver la programación en una configuración de taller de producción flexible. Para optimizar el problema, los autores proponen un ACO.

Por otro lado, en Li et al. [55] también se utiliza ACO, pero en una versión multiobjetivo, es decir, MACO. Los objetivos son la minimización de tiempos y costos asociados con: instalación, procesamiento y transferencia. Los resultados obtenidos por MACO se comparan con una versión de NSGA-II, mostrando que MACO supera a NSGA-II.

Otro tipo de enfoque es abordar la programación considerando los sistemas de colas, como [48]. En este trabajo los autores buscan optimizar el equilibrio de la carga de trabajo y los tiempos de transporte. Para solucionar el problema se desarrollaron algoritmos basados en el tiempo de procesamiento de las tareas y en PSO.

Li y Luo [56], se aborda un problema de tipo taller considerando las plataformas CMfg. Este problema es mono-objetivo y tiene como objetivo minimizar la penalización por retrasos en el trabajo. Para resolver los problemas se utilizó un GA. Los problemas de programación en CMfg no están exentos de enfrentar incertidumbres inherentes a los procesos de producción.

En este sentido, Ding et al. [57] estudian un problema de programación en el que los proveedores de servicios están sujetos a interrupciones aleatorias. Ante este escenario, el problema considera como métricas de optimización: aptitud, robustez y estabilidad. La robustez y la estabilidad buscan minimizar el impacto de las interrupciones en el rendimiento del sistema, mientras que la aptitud resume los criterios clásicos como tiempos, costos y confiabilidad. Para resolver el problema, los autores desarrollan un procedimiento de 2 etapas basado en GA.

Otro problema estocástico se aborda en Li et al. [58] utilizando un enfoque difuso. El artículo plantea cuatro problemas diferentes que describen diferentes condiciones del problema y la incertidumbre. Para cada caso, los autores desarrollan algoritmos ACO ajustados a los problemas.

En Shi et al. [59] se aborda un problema de programación CMfg, buscando minimizar costos y tiempos de producción. Para solucionar el problema, se desarrolla un algoritmo basado en Bat Algorithm y Cellular Automata.

Lin et al. [60], proponen un modelo que integra las capas de asignación y programación en CMfg, mejorando así la capacidad de obtener un óptimo global. El problema estudiado considera la minimización de tiempos de producción, costos de alquiler y transporte. Para resolver este problema multiobjetivo, los autores utilizan MOEA / D.

Más recientemente, Laili et al. [61] profundizan en el estudio de diferentes metaheurísticas multiobjetivo para problemas de programación en CMfg. IBEA, MOEA / D, NSGA-II, NSGA-III, PICEA-g, RVEA se comparan en problemas que buscan minimizar conjuntamente: tiempo de procesamiento, costo de procesamiento, transporte, tiempo de inactividad y tiempo de demora.

Otro problema multiobjetivo se abordó en Fazeli et al. [62]. Los criterios que se buscaron optimizar en este trabajo fueron los tiempos totales de servicio, los costos, la calidad del servicio y la disponibilidad de los proveedores. Para resolver el problema se desarrollaron métodos ensamblados, donde el problema se resuelve en paralelo utilizando diferentes algoritmos, a saber, GA, PSO y SSO (Social Spider Optimization). Luego se compilan las tres soluciones y se proporciona la mejor de todas.

Machine Learning e Inteligencia Artificial

Esta subsección analiza los artículos que han utilizado métodos basados en Machine Learning o Inteligencia Artificial. Esta subsección muestra claramente la velocidad con la que está creciendo el área de Programación en Cloud Manufacturing, ya que en la revisión de [9] prácticamente no se encontraron trabajos sobre estos enfoques, mientras

que desde la publicación de dicha revisión a la fecha se han registrado varias publicaciones nuevas en este campo.

Como primera contribución en esta línea es Liu et al. [5], donde los mismos autores que en [9], proponen un estudio exploratorio sobre el tema. En este caso, se propone un enfoque basado en el aprendizaje profundo por refuerzo (DRL), que combina los beneficios del aprendizaje profundo con el aprendizaje por refuerzo. El trabajo desarrolla un framework donde los diferentes problemas de programación en entornos CMfg se pueden resolver desde DRL. El DRL permitiría extraer automáticamente características de alto nivel de tareas y recursos y aprender patrones de programación, reglas y enfoques inherentes.

Otro trabajo en esta misma línea se encuentra en Chen et al. [63]. En este trabajo, el objetivo es minimizar el alcance y la distancia recorrida total. Para obtener soluciones no dominadas, los autores desarrollan un sistema de agentes que toman decisiones utilizando un método RLAP (Reinforcement Learning based Assigning Policy). El RLAP asigna tareas secuencialmente a cada agente, esto les permite resolver problemas de características dinámicas.

Por otro lado, en Dong et al. [64] se propone un método DQN (Deep-Q-Network) para el problema de asignación de tareas, que incluye una clasificación de las tareas y el estado actual del proceso. El método propuesto se compara con otras heurísticas de resolución clásicas en experimentos que buscan minimizar la duración. Los experimentos muestran los beneficios de DQN al superar a los otros métodos.

Otra aplicación basada en ANN (Artificial Neural Networks) se puede encontrar en Zhu et al. [65]. Aquí, un problema de demanda de múltiples usuarios y el problema de asignación de recursos se presentan como un problema de optimización de múltiples objetivos. Este problema multiobjetivo busca minimizar el tiempo de operación, maximizando el uso de recursos y minimizando los gastos generales. Los autores transforman el problema multiobjetivo en un problema de aprendizaje por refuerzo (RL) y lo resuelven utilizando ANN.

En Morariu et al. [66], se aplican redes neuronales recurrentes (RNN). En este caso, los autores utilizan el RNN para generar un predictor de escenarios futuros y así calcular la programación. Es decir, los proveedores de recursos productivos brindan información en tiempo real, sobre el estado actual. Esta información es filtrada y procesada por RNN, para estimar el escenario futuro cercano, y esto alimenta al optimizador que calcula la programación.

Otras Aproximaciones

Finalmente, en este último inciso presentamos el conjunto de trabajos que contribuyen a la programación en CMfg, pero que por sus características no entran en ninguno de los incisos anteriores (o si ingresan entrarían en más de uno). Por tanto, estos trabajos se analizan individualmente.

El primer trabajo de este grupo es Zhou et al. [67]. En este trabajo, los autores proponen un modelo basado en la simulación de eventos discretos. Este modelo les permite estudiar las relaciones dinámicas que afectan al sistema CMfg global, es decir, cómo son los vínculos entre proveedores, clientes y propietarios de la plataforma. Proponen

experimentos sobre variaciones en la demanda y en los recursos, argumentando que este trabajo será importante para futuros desarrollos dinámicos de CMfg.

En línea con el trabajo anterior, Zhou et al. [68] también proponen una lógica de análisis de los hechos que están ocurriendo. Sin embargo, en este trabajo, los autores van un paso más allá y desarrollan métodos heurísticos para secuenciar tareas (programación dinámica activada por eventos). Esta heurística se basa en estudiar qué eventos requieren la activación de una nueva operación y cuáles no. De esta forma, la heurística propuesta permite obtener mejores resultados que otras heurísticas.

Otro trabajo que propone un método altamente personalizado para la programación en CMfg es He et al. [69]. En este trabajo, los autores trabajan en un problema similar al [47], pero cambiando el enfoque de asignación. En este caso, el método de resolución se basa en una heurística que resuelve la programación analizando las prioridades del trabajo. Estas prioridades están modeladas de tal manera que permiten optimizar todos los objetivos en el mismo indicador de prioridad.

En entornos de Fabricación Aditiva, la asignación de tareas al proveedor correcto es un tema central en la resolución del Scheduling en CMfg. Por eso Wang et al. [70] proponen un método especial basado en algoritmos de visión por computadora. De esta forma, los factores de forma y las dimensiones de las tareas encargadas por los clientes pueden coincidir con el proveedor correcto. La planificación de las operaciones se basa en los resultados de los algoritmos de visión artificial.

El último de los trabajos heterogéneos, Zhou et al. [65], analiza especialmente el impacto de los servicios logísticos implícitos en cada sistema CMfg. Para ello, lo que se propone en este artículo es generar un conjunto de prestadores de servicios de manufactura preseleccionados, para luego asignar tareas considerando la eficiencia logística. Para lograr la eficiencia en el servicio logístico, se utiliza un método heurístico que basa su procedimiento en la distancia entre clientes y proveedores.

7.3.2. Discusiones y Futuras Investigaciones

En este apartado se analiza la revisión realizada de forma global y en base a ella se identifican y detallan las líneas de investigación futuras. Para estructurar los comentarios sobre la revisión realizada se mantiene la misma estructura en base a los métodos de resolución del apartado 4. A continuación, se introducen las líneas de investigación que surgen del estudio realizado.

Discusión de Resultados

Como primer resumen de la revisión realizada, se presenta la [Figura 13](#). La misma muestra la representatividad de cada uno de los métodos utilizados para resolver problemas de programación en la fabricación en la nube en términos de porcentajes del total de artículos revisados.

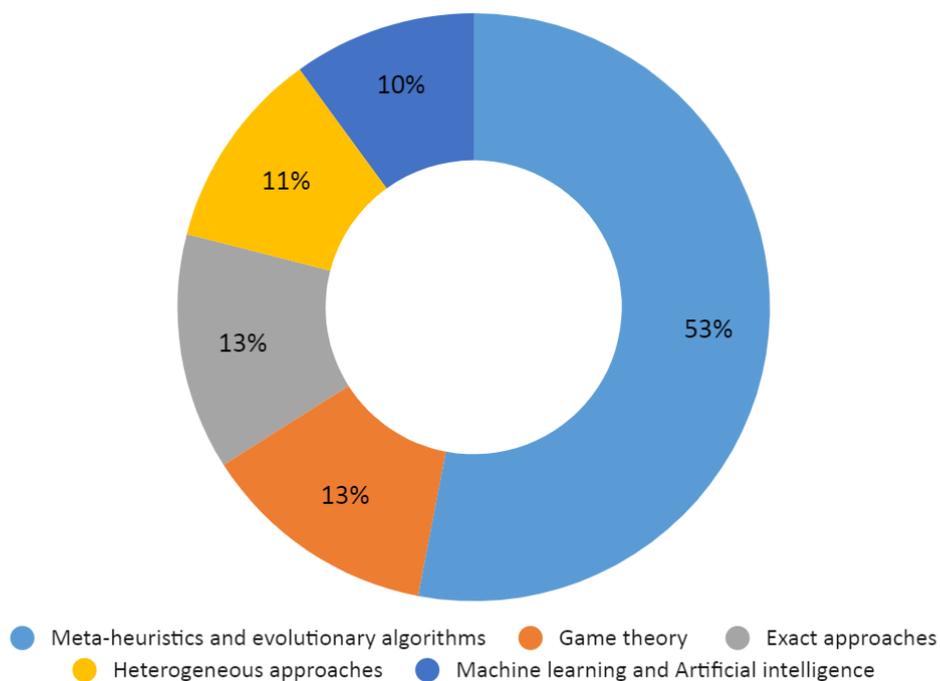


Figura 13. Enfoques de resolución utilizados para la programación en la fabricación en la nube.

(1) Métodos Exactos

El primer grupo de artículos analizados estuvo constituido por artículos que correspondían a métodos de resolución exactos. Este tipo de enfoques representan el 13% como se observa en la Figura 3. Dentro de los trabajos revisados es interesante descartar que, al estudiar el problema con enfoques exactos, el análisis estructural del problema y su comportamiento adquieren otra profundidad. Ser capaz de estudiar la complejidad del problema y proponer métodos y estrategias que permitan resolver el problema de forma óptima en determinados casos [37].

Por otro lado, estudiar el problema de una manera matemáticamente exacta puede obtener nuevos conocimientos sobre cómo se escala el problema a medida que aumenta de tamaño. Ya que, al ser un paradigma basado en la nube, el criterio de pago por uso puede hacer que el sistema crezca considerablemente en muy poco tiempo. Crecimiento que supondría una presión considerable sobre la plataforma a la hora de vincular a los clientes con los proveedores para que se sigan garantizando las condiciones del servicio.

(2) Teoría de Juegos

A partir de la revisión de los artículos asociados a la teoría de juegos, los modelos y resultados obtenidos son muy interesantes y prometedores. Naturalmente, la teoría de juegos permite resolver un problema de decisión de forma descentralizada y eficiente, donde cada jugador saca lo mejor que puede para el escenario enfrentado. Aunque el estudio de programación de CMfg es muy reciente, existe una clara evidencia (el 13% de los trabajos revisados utilizan este enfoque) de que es un enfoque más que adecuado para este problema.

(3) Meta-heurísticas y Algoritmos Evolutivos.

Las metaheurísticas han sido ampliamente el método más utilizado para abordar la Programación en CMfg, representando más del 50% de los artículos revisados. La principal justificación de este porcentaje puede ser la complejidad computacional de los problemas de programación, donde en muchos casos son NP-completos (Lenstra et al. [71]).

Además, muchas veces se debe resolver el problema de igualar o asignar el pedido de cada cliente a cada proveedor de servicios [16], lo que agrega dificultad.

Por otro lado, dada la versatilidad de los algoritmos evolutivos para abordar diferentes tipos de problemas combinatorios, son un enfoque más que interesante para abordar problemas como el aquí estudiado. Donde, hay muchas características nuevas que necesitan ser exploradas, pero las características que ya se conocen indican problemas muy complejos.

Un indicador de esta última consideración es la gran cantidad de artículos revisados que utilizan GA para resolver el problema. GA es el método de algoritmos evolutivos más utilizado, pero también el más general. Por tanto, se podría inferir que todavía hay mucho espacio para el diseño de algoritmos evolutivos más adaptados.

(4) Machine learning e Inteligencia Artificial.

El último grupo de trabajos asociados a un enfoque de resolución es el de Machine learning e Inteligencia Artificial. Estos métodos de resolución se han disparado en los últimos años, extendiendo sus capacidades y aplicaciones a áreas que nunca se habían pensado desde esa perspectiva [72]. Incluso las revisiones anteriores de CMfg no han encontrado artículos al respecto, como lo menciona [5]. De todos los grupos de trabajos reseñados, este es el más pequeño, representando el 10% de los artículos. Sin embargo, esos artículos han demostrado que los enfoques de aprendizaje automático pueden ser valiosos para abordar los problemas de asignación basados en preferencias.

Futuras Líneas de Investigación

El tema de la programación en la fabricación en la nube es un tema de creciente interés en la comunidad científica, donde se han realizado contribuciones notables en el modelado y la resolución de problemas relacionados. Sin embargo, queda mucho por alcanzar la madurez que ha alcanzado la programación en otros campos, por eso a continuación se proponen una serie de líneas de investigación. Las líneas de investigación aquí propuestas buscan potenciar los desarrollos reseñados en este trabajo, con especial énfasis en los procesos de optimización. Para investigar líneas de investigación más generales como descomposición de tareas, emparejamiento, etc. visite [9].

(1) Optimización multi-objetivo.

Como primera línea de investigación, se propone profundizar en el estudio de problemas multiobjetivo. Los problemas multiobjetivos surgen cuando existen objetivos en conflicto para el mismo problema. Por tanto, no se puede mejorar el rendimiento obtenido en un objetivo sin afectar negativamente a otro de los objetivos (Deb [73]).

En este sentido, un entorno como CMfg es un entorno natural para la exploración de este tipo de problemas, en el que participan diferentes agentes con objetivos distintos (y no pocas veces conflictivos).

Por otro lado, la revisión de la literatura evidenció esta necesidad de estudiar el problema desde una perspectiva multiobjetivo. Especialmente en los trabajos que utilizaron metaheurísticas, la gran mayoría se ocupó de una versión multiobjetivo del problema.

En muchos casos, el objetivo fue minimizar los costos de producción y los tiempos de producción, algo que naturalmente es un contrapunto, ya que para acelerar la producción (y reducir los tiempos) es necesario aumentar la cantidad de recursos asignados (aumento de costos). Esta situación se acentúa si se considera la calidad del servicio de producción. Una forma básica de abordar este problema es transformar el problema en un solo objetivo, por ejemplo, aplicando algún método de suma ponderada de los diferentes objetivos.

En este sentido, se encontraron artículos que utilizaron AHP para desarrollar esta ponderación de manera realista y relevante para los tomadores de decisiones [49]. O en otros casos, resolviendo de forma secuencial problemas de un solo objetivo utilizando el método ϵ -constraints [36]. Más allá de la validez y la contribución que estos enfoques hacen al estudio de problemas multiobjetivo, fueron pocos los casos en los que se

estudió el conjunto de soluciones de Pareto Optimal. En este sentido, se detectaron algunos artículos que han trabajado en este conjunto de soluciones ([55], [60], [61]).

Sin embargo, el análisis posterior de las soluciones no dominadas será realmente valioso para la programación en CMfg, ya que permitirá profundizar en la estructura del problema y ayudar a comprender el impacto de las diferentes variantes del problema.

Al abordar este problema, se puede inferir que el uso de algoritmos evolutivos es el principal camino a seguir. Este último comentario se apoya en la revisión que aquí se hace, donde más del 50% de los artículos basan su proceso de optimización en estos métodos.

(2) Métodos de Decisión Descentralizados.

Otra línea de investigación que contribuirá al desarrollo científico de Scheduling en CMfg es el análisis de métodos de decisión descentralizados. La oportunidad de desarrollar métodos que faciliten la libre acción de los participantes de la plataforma, tanto clientes como proveedores de servicios, contribuirá a mejorar el desarrollo de CMfg como modelo de negocio.

Un claro ejemplo se encontró en esta revisión en aquellos trabajos que han desarrollado modelos de resolución basados en la teoría de juegos. Considerando los trabajos reseñados como puntos de partida, será interesante profundizar en el estudio de problemas de teoría de juegos con información incompleta, donde los participantes no conocen al resto de participantes y se deben desarrollar mecanismos que permitan la convergencia al equilibrio. De esta manera, se pueden representar escenarios con un número creciente de participantes, alineados con la lógica de pago por uso de CMfg.

(3) Modelos de Negocios.

Dado el impacto de la programación en los costos y beneficios de cada participante, es importante estudiar los modelos de negocios que permiten a los participantes de CMfg relacionar directamente las decisiones tomadas con sus objetivos comerciales.

Aunque la estrategia del modelo de negocio supera el problema de optimización de la programación en CMfg, lo cierto es que el nivel de servicio de CMfg dependerá directamente de la programación de la producción [9], ya sea en los tiempos de entrega o en la calidad de los productos.

Un claro indicio de que los modelos de negocio tienen mayor peso en la programación en CMfg, que en los problemas de programación en los paradigmas de fabricación más tradicionales, es que de los artículos revisados en este trabajo, la mayoría consideraba los costos como un objetivo de optimización, mientras que en los paradigmas tradicionales esto rara vez ocurre.

Además, en el caso de los artículos que abordaron el problema de forma multiobjetivo en CMfg, en todos los casos se analizó algún tipo de costes.

Por tanto, es claro que, si un indicador de si un cronograma es bueno o malo es el costo que ese cronograma genera, naturalmente la relación entre cronograma y modelo de negocio es mucho más cercana para CMfg que para otros paradigmas.

Incluso en esta línea, el modelo de negocio se puede estudiar desde la perspectiva del propietario de la plataforma CMfg, por lo que en ese caso, tanto los clientes como los proveedores de recursos son participantes externos al propietario, lo que facilita modelos que permitan asegurar la equidad entre los participantes.

(4) Analytics y Machine Learning.

CMfg es un modelo que proporciona información tanto a clientes como a proveedores de servicios. Esta información puede provenir de la contraparte (clientes-proveedores o, proveedores-clientes), o incluso de registros de transacciones pasadas. Por tanto, la plataforma CMfg, al comportarse como un hub que conecta los enlaces en el proceso, tiene acceso a información valiosa para el estudio de la programación.

Especialmente en el estudio de perfiles de clientes y proveedores de servicios, para que al analizar el historial de decisiones y preferencias que han desarrollado, la misma plataforma pueda hacer sugerencias que aceleren la convergencia hacia un horario óptimo.

En este sentido, es interesante la posibilidad de intentar predecir el escenario futuro de tal forma que todo el sistema esté en sintonía tomando una dirección correcta, como propone [34]. Este hilo deja la puerta abierta al estudio de problemas de programación dinámica en CMfg, como ya se destacó en [9].

La disponibilidad de información directa y en tiempo real de los sistemas involucrados permite reducir el margen a eventos inesperados que generalmente desencadenan procesos de reprogramación (Vieira et al. [74], Rossit et al. [75]).

Sin embargo, para poder capitalizar esa información disponible en un beneficio específico en la programación, se deben desarrollar métodos eficientes y ágiles para procesar e interpretar la información.

(5) Métodos Exactos.

Aunque la complejidad de la programación en sí misma es un obstáculo natural para el enfoque basado en métodos exactos, este tipo de métodos permiten una visión crítica y analítica que muchos otros métodos no ofrecen.

Un claro ejemplo lo proporciona [3], donde se proponen una serie de modelos MIP para el estudio de la programación en CMfg.

Además, los enfoques basados en la programación de restricciones [34] o la programación dinámica [37] son prometedores.

Por otro lado, el estudio de la complejidad de este tipo de problemáticas también contribuye notablemente al desarrollo del tema y su profundización, por lo que se destaca como línea de investigación el abordaje basado en métodos exactos.

Bibliografía

- [1] Atziori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey computer networks.
- [2] Delaram, J., & Valilai, O. F. (2018). A mathematical model for task scheduling in cloud manufacturing systems focusing on global logistics. *Procedia manufacturing*, 17, 387-394.
- [3] H. Akbaripour, M. Houshmand, T. Van Woensel, and N. Mutlu. Cloud manufacturing service selection optimization and scheduling with transportation considerations: mixed-integer programming models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1-4):43–70, 2018.
- [4] Liu, Y., Wang, L., Wang, X. V., Xu, X., & Jiang, P. (2019). Cloud manufacturing: key issues and future perspectives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(9), 858-874.
- [5] Liu, Y., Zhang, L., Wang, L., Xiao, Y., Xu, X., & Wang, M. (2019). A framework for scheduling in cloud manufacturing with deep reinforcement learning. In 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN) (Vol. 1, pp. 1775-1780). IEEE.
- [6] Wu, D., Rosen, D. W., Wang, L., & Schaefer, D. (2015). Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Computer-Aided Design*, 59, 1-14.
- [7] Bai, T., Liu, S., & Zhang, L. (2018). A manufacturing task scheduling method based on public goods game on cloud manufacturing model. In 2018 4th International Conference on Universal Village (UV) (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Liu, Y., Wang, L., & Wang, X. V. (2018). Cloud manufacturing: latest advancements and future trends. *Procedia Manufacturing*, 25(8), 62-73.
- [9] Liu, Y., Wang, L., Wang, X. V., Xu, X., & Zhang, L. (2019). Scheduling in cloud manufacturing: state-of-the-art and research challenges. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 4854-4879.
- [10] Pinedo, M. (2012). *Scheduling* (Vol. 29). New York: Springer.
- [11] Tao, F., Zhang, L., Liu, Y., Cheng, Y., Wang, L., & Xu, X. (2015). Manufacturing service management in cloud manufacturing: overview and future research directions. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(4).
- [12] Cheng, Y., Tao, F., Zhao, D., & Zhang, L. (2017). Modeling of manufacturing service supply–demand matching hypernetwork in service-oriented manufacturing systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 45, 59-72.
- [13] Adamson, G. (2018). A Novel Method for Adaptive Control of Manufacturing Equipment in Cloud Environments.
- [14] Fisher, O., Watson, N., Porcu, L., Bacon, D., Rigley, M., & Gomes, R. L. (2018). Cloud manufacturing as a sustainable process manufacturing route. *Journal of manufacturing systems*, 47, 53-68.

- [15] Mell, P., & Grance, T. (2009). Perspectives on cloud computing and standards. Usa, Nist.
- [16] Xu, X. (2012). From cloud computing to cloud manufacturing. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 28(1), 75-86.
- [17] Zhou, L., Zhang, L., Zhao, C., Laili, Y., & Xu, L. (2018). Diverse task scheduling for individualized requirements in cloud manufacturing. *Enterprise Information Systems*, 12(3), 300-318.
- [18] Li, Z., Zhang, W., Wang, Z., & Wang, Z. (2015). Service Monitoring of Production and Processing in Cloud Manufacturing. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 21(7), 1953-1962.
- [19] Wang, L. (2013). Machine availability monitoring and machining process planning towards Cloud manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6(4), 263-273.
- [20] Mourtzis, D., Vlachou, E., Milas, N., & Dimitrakopoulos, G. (2016). Energy consumption estimation for machining processes based on real-time shop floor monitoring via wireless sensor networks. *Procedia CIRP*, 57, 637-642.
- [21] Liu, Y., Xu, X., Srinivasan, A., & Zhang, L. (2017). Enterprises in cloud manufacturing: A preliminary exploration. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference* (Vol. 50749, p. V003T04A042). American Society of Mechanical Engineers.
- [22] Wang, L., Gao, R., & Ragai, I. (2014). An integrated cyber-physical system for cloud manufacturing. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference* (Vol. 45806, p. V001T04A029). American Society of Mechanical Engineers.
- [23] Adamson, G., Wang, L., Holm, M., & Moore, P. (2015). Adaptive robot control as a service in cloud manufacturing. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference* (Vol. 56833, p. V002T04A020). American Society of Mechanical Engineers.
- [24] Feng, Y., & Huang, B. (2018). A hierarchical and configurable reputation evaluation model for cloud manufacturing services based on collaborative filtering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9-12), 3327-3343.
- [25] Zhou, L., Zhang, L., Zhao, C., Laili, Y., & Xu, L. (2018). Diverse task scheduling for individualized requirements in cloud manufacturing. *Enterprise Information Systems*, 12(3), 300-318.
- [26] Li, F., Liao, T. W., & Zhang, L. (2019). Two-level multi-task scheduling in a cloud manufacturing environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 56, 127-139.
- [27] Yi, G., Hu, H., Zhang, S., & Sun, L. (2018). Cloud Service Composition with Multiple QoS Constraints for Manufacturing Resource. In *2018 IEEE 15th International Conference on e-Business Engineering (ICEBE)* (pp. 158-163). IEEE.
- [28] Tao, F., Cheng, J., Cheng, Y., Gu, S., Zheng, T., & Yang, H. (2017). SDMSim: a manufacturing service supply–demand matching simulator under cloud environment. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 45, 34-46.

- [29] Xiaoxue, B., Dong, Y., Yi, H., & Jinsong, L. (2019, October). A Resource Storage Model and Supply-Demand Matching Method Based on Cloud Manufacturing. In 2019 12th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA) (pp. 626-632). IEEE.
- [30] Kang, L., Chen, G. S., Wang, S. L., Li, Q., Guo, L., & Song, W. Y. (2013). Ontology based process resource discovery for cloud manufacturing. *Comput Integr Manuf Syst*, 19(9), 2325-2331.
- [31] Zhang, Y., Xi, D., Li, R., & Sun, S. (2016). Task-driven manufacturing cloud service proactive discovery and optimal configuration method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(1-4), 29-45.
- [32] Guo, L., Wang, S., Kang, L., & Cao, Y. (2015). Agent-based manufacturing service discovery method for cloud manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9-12), 2167-2181.
- [33] Tao, F., LaiLi, Y., Xu, L., & Zhang, L. (2013). FC-PACO-RM: a parallel method for service composition optimal-selection in cloud manufacturing system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(4), 2023-2033.
- [34] Zhang, L., Yu, C., & Wong, T. N. (2019). Cloud-based frameworks for the integrated process planning and scheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(12), 1192-1206.
- [35] Suma, T., & Murugesan, R. Study on Multi-Task Oriented Service Composition and Optimization Problem of Customer Order Scheduling Problem Using Fuzzy Min-Max Algorithm.
- [36] Vahedi-Nouri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rohaninejad, M. (2019). A multi-objective scheduling model for a cloud manufacturing system with pricing, equity, and order rejection. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2177-2182.
- [37] Wang, D., Yu, Y., Yin, Y., & Cheng, T. C. E. (2020). Multi-agent scheduling problems under multitasking. *International Journal of Production Research*, 1-31.
- [38] Liu, Y., Wang, L., Wang, Y., Wang, X. V., & Zhang, L. (2018a). Multi-agent-based scheduling in cloud manufacturing with dynamic task arrivals. *Procedia CIRP*, 72, 953-960.
- [39] Xiao, J., Zhang, W., Zhang, S., & Zhuang, X. (2019). Game theory-based multi-task scheduling in cloud manufacturing using an extended biogeography-based optimization algorithm. *Concurrent Engineering*, 27(4), 314-330.
- [40] Chen, J., Huang, G. Q., Wang, J. Q., & Yang, C. (2019). A cooperative approach to service booking and scheduling in cloud manufacturing. *European Journal of Operational Research*, 273(3), 861-873.
- [41] Liu, Z. H., Wang, Z. J., & Yang, C. (2019d). Multi-objective resource optimization scheduling based on iterative double auction in cloud manufacturing. *Advances in Manufacturing*, 7(4), 374-388.

- [42] Zhou, L., Zhang, L., Laili, Y., Zhao, C., & Xiao, Y. (2018a). Multi-task scheduling of distributed 3D printing services in cloud manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(9-12), 3003-3017.
- [43] Simeone, A., Caggiano, A., Deng, B., Zeng, Y., & Boun, L. (2018). Resource efficiency optimization engine in smart production networks via intelligent cloud manufacturing platforms. *Procedia CIRP*, 78, 19-24.
- [44] Helo, P., Phuong, D., & Hao, Y. (2019). Cloud manufacturing—scheduling as a service for sheet metal manufacturing. *Computers & Operations Research*, 110, 208-219.
- [45] Suma, T., & Murugesan, R. (2018, April). Artificial Immune Algorithm for Subtask Industrial Robot Scheduling in Cloud Manufacturing. In *J. Phys. Conf. Ser (Vol. 1000*, pp. 1-8).
- [46] Yuan, M., Cai, X., Zhou, Z., Sun, C., Gu, W., & Huang, J. (2019). Dynamic service resources scheduling method in cloud manufacturing environment. *International Journal of Production Research*, 1-18.
- [47] He, W., Jia, G., Zong, H., & Kong, J. (2019b). Multi-Objective Service Selection and Scheduling with Linguistic Preference in Cloud Manufacturing. *Sustainability*, 11(9), 2619.
- [48] Jafarnejad Ghomi, E., Masoud Rahmani, A., & Nasih Qader, N. (2019). Service load balancing, task scheduling and transportation optimisation in cloud manufacturing by applying queuing system. *Enterprise Information Systems*, 13(6), 865-894.
- [49] Hu, Y., Zhu, F., Zhang, L., Lui, Y., & Wang, Z. (2019). Scheduling of manufacturers based on chaos optimization algorithm in cloud manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 58, 13-20.
- [50] Zhang, F., Hui, J., Zhu, B., & Guo, Y. (2019a). An improved firefly algorithm for collaborative manufacturing chain optimization problem. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(6), 1711-1722.
- [51] Zhang, W., Ding, J., Wang, Y., Zhang, S., & Xiong, Z. (2019d). Multi-perspective collaborative scheduling using extended genetic algorithm with interval-valued intuitionistic fuzzy entropy weight method. *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 249-260.
- [52] Elgendy, A., Yan, J., & Zhang, M. (2019). Integrated Strategies to an Improved Genetic Algorithm for Allocating and Scheduling Multi-Task in Cloud Manufacturing Environment. *Procedia Manufacturing*, 39, 1872-1879.
- [53] Du, Y., Wang, J. L., & Lei, L. (2019). Multi-objective scheduling of cloud manufacturing resources through the integration of Cat swarm optimization and Firefly algorithm. *Advances in Production Engineering & Management*, 14(3).
- [54] Zhang, H., Ma, C., Zhang, S., & Liu, S. (2019b). Research on the FJSS problem with discrete equipment capability in cloud manufacturing environment. *International Journal of Internet Manufacturing and Services*, 6(2), 123-138.

- [55] Li, F., Zhang, L., Liao, T. W., & Liu, Y. (2019). Multi-objective optimisation of multi-task scheduling in cloud manufacturing. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3847-3863.
- [56] Li, Y., & Luo, G. (2019, October). Solving Flexible Job Shop Scheduling Problem in Cloud Manufacturing Environment Based on Improved Genetic Algorithm. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 612, No. 4, p. 042065). IOP Publishing.
- [57] Ding, J., Wang, Y., Zhang, S., Zhang, W., & Xiong, Z. (2019). Robust and stable multi-task manufacturing scheduling with uncertainties using a two-stage extended genetic algorithm. *Enterprise Information Systems*, 13(10), 1442-1470.
- [58] Li, F., Liao, W., Cai, W., & Zhang, L. (2020). Multi-task Scheduling in Consideration of Fuzzy Uncertainty of Multiple Criteria in Service-oriented Manufacturing. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*.
- [59] Shi, Y., Luo, L., & Guang, H. (2019, April). Research on Scheduling of Cloud Manufacturing Resources Based on Bat Algorithm and Cellular Automata. In *2019 IEEE International Conference on Smart Manufacturing, Industrial & Logistics Engineering (SMILE)* (pp. 174-177). IEEE.
- [60] Lin, S., Laili, Y., & Luo, Y. (2018, October). Integrated optimization of supplier selection and service scheduling in cloud manufacturing environment. In *2018 4th International Conference on Universal Village (UV)* (pp. 1-6). IEEE.
- [61] Laili, Y., Lin, S., & Tang, D. (2020). Multi-phase integrated scheduling of hybrid tasks in cloud manufacturing environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101850.
- [62] Fazeli, M. M., Farjami, Y., & Nickray, M. (2019). An ensemble optimisation approach to service composition in cloud manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(1), 83-91.
- [63] Chen, S., Fang, S., & Tang, R. (2019). A reinforcement learning based approach for multi-projects scheduling in cloud manufacturing. *International Journal of Production Research*, 57(10), 3080-3098.
- [64] Dong, T., Xue, F., Xiao, C., & Li, J. (2020). Task scheduling based on deep reinforcement learning in a cloud manufacturing environment. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 32(11), e5654.
- [65] Zhou, L., Zhang, L., & Fang, Y. (2020). Logistics service scheduling with manufacturing provider selection in cloud manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, 101914.
- [66] Morariu, C., Morariu, O., Răileanu, S., & Borangiu, T. (2020). Machine learning for predictive scheduling and resource allocation in large scale manufacturing systems. *Computers in Industry*, 120, 103244.
- [67] Zhou, L., Zhang, L., & Ren, L. (2018b, October). Simulation Model of Dynamic Service Scheduling in Cloud Manufacturing. In *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 4199-4204). IEEE.

- [68] Zhou, L., Zhang, L., Sarker, B. R., Laili, Y., & Ren, L. (2018c). An event-triggered dynamic scheduling method for randomly arriving tasks in cloud manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(3), 318-333.
- [69] He, W., Jia, G., Zong, H., & Huang, T. (2019). Multi-Objective Cloud Manufacturing Service Selection and Scheduling with Different Objective Priorities. *Sustainability*, 11(17), 4767.
- [70] Wang, Y., Zheng, P., Xu, X., Yang, H., & Zou, J. (2019). Production planning for cloud-based additive manufacturing—A computer vision-based approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 58, 145-157.
- [71] Lenstra, J. K., Kan, A. R., & Brucker, P. (1977). Complexity of machine scheduling problems. In *Annals of discrete mathematics* (Vol. 1, pp. 343-362). Elsevier.
- [72] Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R. X., & Wu, D. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 144-156.
- [73] Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms* (Vol. 16). John Wiley & Sons.
- [74] Vieira, G. E., Herrmann, J. W., & Lin, E. (2003). Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies, and methods. *Journal of scheduling*, 6(1), 39-62.
- [75] Rossit, D. A., Tohmé, F., & Frutos, M. (2019). Industry 4.0: smart scheduling. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3802-3813.

Anexo II: Validación de Modelos

Validación Modelo de Asignación

Caso 5: Demanda Nula - Capacidad de almacenamiento de leche cruda insuficiente

Al igual que en el caso anterior, se trabaja con demanda nula, con la particularidad que la fábrica más cercana a los tambos no tiene la capacidad para almacenar la totalidad de la leche producida por estos.

A partir de esto, la salida del modelo debería ser tal que se divida el envío de los tambos a las fábricas (de un tambo a una fábrica y del otro tambo a la otra fábrica).

Los resultados del modelo indican un comportamiento acorde al esperado

Tabla 11: Modelo de asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 5..

| PARÁMETROS | | | | | |
|---------------------------------|--------------|------------|------------|--------------|----------------|
| Tambo (m) | L_m | | dMS_{ms} | Utarg | Ala |
| T1 | 1000 | | T1 | 10 | 120 |
| T2 | 200 | | T2 | 10 | 100 |
| Fábrica (s) | $QPmax_s$ | | dSC_{sc} | Salto | Colonia |
| Utarg | 1000 | | Utarg | 7 | 400 |
| Ala | 1000 | | Ala | 7 | 400 |
| QT | 500 | | | | |
| VARIABLES | | | | | |
| q_{ms} | Utarg | Ala | v_{ms} | Utarg | Ala |
| T1 | 1000 | 0 | T1 | 2 | 0 |
| T2 | 0 | 200 | T2 | 0 | 1 |
| x_{pcs} | 0 | | | | |

Caso 6: Fábrica eficiente vs Fábrica ineficiente (en términos de tiempo)

Se igualarán parámetros relacionados a distancias y costos haciendo que la única diferencia entre ambas fábricas se dé en los tiempos de fabricación. El resultado esperado es que la salida del modelo sugiera producir en la fábrica con menores tiempos.

En este caso particular, la fábrica con peores tiempos de fabricación será la única fábrica "capaz" de producir uno de los productos derivados de la crema de leche. Por lo que, aun teniendo valores mucho peores que la otra fábrica, el sistema deberá sugerir la fabricación en la misma.

Tabla 12: Modelo de Asignación - Parámetros y variables del caso de validación 6.

PARÁMETROS

| Tambo (m) | L_m |
|---------------|-------|
| T1 | 1000 |
| T2 | 200 |

| Producto (a) | $ConvL_a$ |
|------------------|-----------|
| Leche Entera | 0,95 |
| Leche Descremada | 0,9 |

| Producto (b) | $ConvC_b$ |
|------------------|-----------|
| Crema Doble | 0,9 |
| Manteca | 0,6 |

| MC_{ps} | Utarg | Ala |
|------------------|-------|-----|
| Leche Entera | 50 | 50 |
| Leche Descremada | 50 | 50 |
| Crema Doble | 80 | 80 |
| Manteca | 80 | 80 |

| MT_{ps} | Utarg | Ala |
|------------------|-------|-----|
| Leche Entera | 0,2 | 1,5 |
| Leche Descremada | 0,2 | 1,6 |
| Crema Doble | 1 | 5 |
| Manteca | 1 | 5 |

| DM_{pc} | Colonia | Salto |
|------------------|---------|-------|
| Leche Entera | 200 | 200 |
| Leche Descremada | 200 | 200 |
| Crema Doble | 20 | 20 |
| Manteca | 10 | 10 |

VARIABLES

| Ciente (c) | Producto (p) | Fábrica (s) | x_{cps} |
|----------------|------------------|-----------------|-----------|
| Colonia | Crema Doble | Ala | 0 |
| Colonia | Crema Doble | Utarg | 20 |
| Colonia | Leche Descremada | Ala | 0 |
| Colonia | Leche Descremada | Utarg | 200 |
| Colonia | Leche Entera | Ala | 0 |
| Colonia | Leche Entera | Utarg | 200 |
| Colonia | Manteca | Ala | 10 |
| Colonia | Manteca | Utarg | 0 |
| Salto | Crema Doble | Ala | 0 |
| Salto | Crema Doble | Utarg | 20 |
| Salto | Leche Descremada | Ala | 0 |
| Salto | Leche Descremada | Utarg | 200 |
| Salto | Leche Entera | Ala | 0 |
| Salto | Leche Entera | Utarg | 200 |
| Salto | Manteca | Ala | 10 |
| Salto | Manteca | Utarg | 0 |

| q_{ms} | Utarg | Ala |
|----------|-------|-------|
| T1 | 665,5 | 334,5 |
| T2 | 200 | 0 |

| Fábrica (s) | Fábrica (k) | e_{sk} |
|-------------|-------------|----------|
| Ala | Utarg | 0 |
| Utarg | Ala | 0 |

| Fábrica (s) | c_s |
|-------------|-------|
| Utarg | 0 |
| Ala | 0 |

Caso 7: Fábrica eficiente con capacidad de producción insuficiente vs Fábrica ineficiente con capacidad de producción suficiente.

Para asegurarnos que la solución del modelo no divida el pedido del cliente, se modificarán los datos de capacidad de producción y demanda de clientes para casos no favorables. Es decir, si una fábrica no tiene la capacidad de producir el pedido completo del cliente, el mismo se debe realizar en la otra, aunque tenga costos y tiempos más altos.

La capacidad de la fábrica más barata/eficiente, no da para procesar toda la leche, la salida del modelo debería sugerir el envío de algunas órdenes a la barata (tantas como capacidad tenga) y el resto a la cara.

Tabla 13: Modelo de asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 7.

PARÁMETROS

| Tambo (m) | L_m |
|-----------|-------|
| T1 | 1000 |
| T2 | 200 |

| Fábrica | $QPmax_s$ |
|---------|-----------|
| Utarg | 400 |
| Ala | 2500 |

| Producto (b) | $ConvC_b$ |
|--------------|-----------|
| Crema Doble | 0,9 |
| Manteca | 0,6 |

| MC_{ps} | Utarg | Ala |
|------------------|-------|-----|
| Leche Entera | 5 | 50 |
| Leche Descremada | 6 | 50 |
| Crema Doble | 8 | 80 |
| Manteca | 8 | 80 |

| MT_{ps} | Utarg | Ala |
|------------------|-------|-----|
| Leche Entera | 0,2 | 1,5 |
| Leche Descremada | 0,2 | 1,6 |
| Crema Doble | 1 | 5 |
| Manteca | 1 | 5 |

| DM_{pc} | Colonia | Salto |
|------------------|---------|-------|
| Leche Entera | 200 | 200 |
| Leche Descremada | 200 | 200 |
| Crema Doble | 20 | 20 |
| Manteca | 10 | 10 |

VARIABLES

| Cliente (c) | Producto (p) | Fábrica (s) | x_{cps} |
|-----------------|------------------|-----------------|-----------|
| Colonia | Crema Doble | Ala | 0 |
| Colonia | Crema Doble | Utarg | 20 |
| Colonia | Leche Descremada | Ala | 200 |
| Colonia | Leche Descremada | Utarg | 0 |
| Colonia | Leche Entera | Ala | 200 |
| Colonia | Leche Entera | Utarg | 0 |
| Colonia | Manteca | Ala | 10 |
| Colonia | Manteca | Utarg | 0 |
| Salto | Crema Doble | Ala | 0 |
| Salto | Crema Doble | Utarg | 20 |
| Salto | Leche Descremada | Ala | 200 |
| Salto | Leche Descremada | Utarg | 0 |
| Salto | Leche Entera | Ala | 0 |
| Salto | Leche Entera | Utarg | 200 |
| Salto | Manteca | Ala | 10 |
| Salto | Manteca | Utarg | 0 |

| q_{ms} | Utarg | Ala |
|----------|--------|---------|
| T1 | 10,526 | 989,474 |
| T2 | 200 | 0 |

| Fábrica (s) | Fábrica (k) | e_{sk} |
|-----------------|-----------------|----------|
| Ala | Utarg | 33,918 |
| Utarg | Ala | 0 |

Caso 8: Mover las demandas y los QT para que se mueva los transportes de M a S

En este caso tendremos una fábrica eficiente a una gran distancia de los tambos y uno a ineficiente a una distancia menor. El costo de los transportes serán lo suficientemente altos para que la salida del modelo termine enviando a la fábrica cercana e ineficiente.

Tabla 14: Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 8.

PARÁMETROS

| Tambo (m) | L_m |
|---------------|-------|
| T1 | 1000 |

| MC_{ps} | Utarg | Ala |
|--------------|-------|-----|
| Leche Entera | 50 | 5 |

| | |
|----|-----|
| T2 | 500 |
|----|-----|

| dMS_{ms} | Utarg | Ala |
|------------|-------|------|
| T1 | 100 | 1000 |
| T2 | 100 | 1000 |

| dSC_{sc} | Colonia | Salto |
|------------|---------|-------|
| Utarg | 300 | 300 |
| Ala | 400 | 400 |

| | |
|------------|----|
| UCT | 20 |
|------------|----|

| | | |
|------------------|----|---|
| Leche Descremada | 50 | 5 |
| Crema Doble | 80 | 8 |
| Manteca | 80 | 8 |

| DM_{pc} | Colonia | Salto |
|------------------|---------|-------|
| Leche Entera | 100 | 100 |
| Leche Descremada | 100 | 100 |
| Crema Doble | 20 | 20 |
| Manteca | 10 | 10 |

VARIABLES

| Cliente (c) | Producto (p) | Fábrica (s) | x_{cps} |
|-----------------|------------------|-----------------|-----------|
| Colonia | Crema Doble | Ala | 0 |
| Colonia | Crema Doble | Utarg | 20 |
| Colonia | Leche Descremada | Ala | 0 |
| Colonia | Leche Descremada | Utarg | 100 |
| Colonia | Leche Entera | Ala | 0 |
| Colonia | Leche Entera | Utarg | 100 |
| Colonia | Manteca | Ala | 10 |
| Colonia | Manteca | Utarg | 0 |
| Salto | Crema Doble | Ala | 0 |
| Salto | Crema Doble | Utarg | 20 |
| Salto | Leche Descremada | Ala | 0 |
| Salto | Leche Descremada | Utarg | 100 |
| Salto | Leche Entera | Ala | 0 |
| Salto | Leche Entera | Utarg | 100 |
| Salto | Manteca | Ala | 10 |
| Salto | Manteca | Utarg | 0 |

| q_{ms} | Utarg | Ala |
|----------|-------|-----|
| T1 | 1000 | 0 |
| T2 | 500 | 0 |

| Fábrica (s) | Fábrica (k) | e_{sk} |
|-----------------|-----------------|----------|
| Ala | Utarg | 0 |
| Utarg | Ala | 33,3333 |

| Fábrica (s) | c_s |
|-----------------|---------|
| Ala | 33,3333 |
| Utarg | 86,1111 |

| v_{ms} | Utarg | Ala |
|----------|-------|-----|
| T1 | 5 | 0 |
| T1 | 3 | 0 |

Caso 9: Modificación de QT, QF y QC

A partir de los datos ingresados en el caso 6 se unifican los ConvV y se modifican la capacidad de los camiones buscando que la cantidad de viajes tambo-fábrica, fábrica-fábrica y fábrica-cliente se incrementen proporcionalmente a la disminución de la propia capacidad.

Tabla 15: Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 9.

| PARÁMETROS | | | | | |
|------------|------------------|--------------|-------------|---------|-----|
| UCT | 20 | | QT | 150 | |
| QF | 10 | | QC | 20 | |
| $ConvV_p$ | Leche Descremada | Leche Entera | Crema Doble | Manteca | |
| | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | |
| VARIABLES | | | | | |
| v_{ms} | Utarg | Ala | u_{sk} | Utarg | Ala |
| T1 | 7 | 0 | Utarg | 0 | 2 |
| T2 | 4 | 0 | Ala | 2 | 0 |
| w_{sc} | Colonia | Salto | | | |
| Utarg | 1 | 1 | | | |
| Ala | 1 | 1 | | | |

Caso 10: Trade-off entre producir en fábrica menos eficiente y traslado a fábrica eficiente

Se definen los parámetros de forma tal que sea más conveniente enviar el litro de leche sobrante a la fábrica menos eficiente (se igualan distancias y MT, diferenciando según MC).

De este modo, se envían dos camiones completos a la más eficiente y uno con lo restante a la menos eficiente. La fabricación del sobrante en la fábrica ineficiente es más barata que el traslado a la eficiente.

Tabla 16: Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 10.

| PARÁMETROS | | | | |
|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Tambo (m) | L_m | MC_{ps} | Utarg | Ala |
| T1 | 150 | Leche Entera | 50 | 5 |
| T2 | 180 | Leche Descremada | 50 | 5 |
| | | Crema Doble | 80 | 8 |
| | | Manteca | 80 | 8 |
| UCT | 20 | | | |
| QT | 150 | DM_{pc} | Colonia | Salto |
| | | Leche Entera | 285 | 1 |
| | | Leche Descremada | 0 | 0 |
| | | Crema Doble | 15 | 0 |
| | | Manteca | 0 | 0 |
| QF | 10 | | | |
| QC | 20 | | | |
| VARIABLES | | | | |
| Cliente (c) | Producto (p) | Fábrica (s) | x_{cps} | |
| Colonia | Crema Doble | Ala | 0 | |
| Colonia | Crema Doble | Utarg | 15 | |
| Colonia | Leche Descremada | Ala | 0 | |
| Colonia | Leche Descremada | Utarg | 0 | |
| Colonia | Leche Entera | Ala | 285 | |
| Colonia | Leche Entera | Utarg | 0 | |
| Colonia | Manteca | Ala | 0 | |
| Colonia | Manteca | Utarg | 0 | |
| Salto | Crema Doble | Ala | 0 | |
| Salto | Crema Doble | Utarg | 0 | |
| Salto | Leche Descremada | Ala | 0 | |
| Salto | Leche Descremada | Utarg | 0 | |
| Salto | Leche Entera | Ala | 0 | |
| Salto | Leche Entera | Utarg | 1 | |
| Salto | Manteca | Ala | 0 | |
| Salto | Manteca | Utarg | 0 | |
| q_{ms} | Utarg | Ala | | |
| T1 | 0 | 150 | | |
| T2 | 30 | 150 | | |
| Fábrica (s) | Fábrica (k) | e_{sk} | | |
| Ala | Utarg | 12,0526 | | |
| Utarg | Ala | 0 | | |

| v_{ms} | Utarg | Ala |
|----------|-------|-----|
| T1 | 0 | 1 |
| T1 | 1 | 1 |

| u_{ss} | Utarg | Ala |
|----------|-------|-----|
| Utarg | 0 | 0 |
| Ala | 1 | 0 |

| w_{sc} | Colonia | Salto |
|----------|---------|-------|
| Utarg | 1 | 0 |
| Ala | 1 | 1 |

Caso 11: Utilización de la capacidad máxima de una de las fábricas

En este caso se intenta validar la capacidad máxima de cada fábrica por tarea. En base a los valores ingresados de los parámetros, la fábrica más “barata” debería de tener el 100% de su capacidad ocupada.

Tal como se ve en las variables obtenidas, la fábrica con los costos más bajos tiene la totalidad de la capacidad ocupada.

Tabla 17: Modelo de Asignación - Parámetros y Variables del caso de validación 11.

PARÁMETROS

| Tambo (m) | L_m |
|---------------|-------|
| T1 | 2000 |
| T2 | 2000 |

| MT_{ps} | Utarg | Ala |
|------------------|-------|-----|
| Leche Entera | 1 | 2 |
| Leche Descremada | 1 | 2 |
| Crema Doble | 1 | 2 |
| Manteca | 1 | 2 |

| Fábrica (s) | $Qmax_s$ |
|-----------------|----------|
| Utarg | 3360 |
| Ala | 3360 |

| MC_{ps} | Utarg | Ala |
|------------------|-------|------|
| Leche Entera | 5 | 8000 |
| Leche Descremada | 5 | 8000 |
| Crema Doble | 5 | 8000 |
| Manteca | 5 | 8000 |

| DM_{pc} | Colonia | Salto |
|------------------|---------|-------|
| Leche Entera | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 3000 | 360 |
| Crema Doble | 10 | 10 |
| Manteca | 10 | 10 |

VARIABLES

| Cliente (c) | Producto (p) | Fábrica (s) | x_{cps} |
|-----------------|------------------|-----------------|-----------|
| Colonia | Crema Doble | Ala | 10 |
| Colonia | Crema Doble | Utarg | 0 |

| | | | |
|---------|------------------|-------|------|
| Colonia | Leche Descremada | Ala | 0 |
| Colonia | Leche Descremada | Utarg | 3000 |
| Colonia | Leche Entera | Ala | 0 |
| Colonia | Leche Entera | Utarg | 0 |
| Colonia | Manteca | Ala | 10 |
| Colonia | Manteca | Utarg | 0 |
| Salto | Crema Doble | Ala | 10 |
| Salto | Crema Doble | Utarg | 0 |
| Salto | Leche Descremada | Ala | 0 |
| Salto | Leche Descremada | Utarg | 360 |
| Salto | Leche Entera | Ala | 0 |
| Salto | Leche Entera | Utarg | 0 |
| Salto | Manteca | Ala | 10 |
| Salto | Manteca | Utarg | 0 |

| q_{ms} | Utarg | Ala |
|----------|---------|---------|
| T1 | 1733,33 | 266,667 |
| T2 | 2000 | 0 |

Validación Modelo de Planificación

Caso 4: Demanda únicamente de Crema Doble y Manteca para el período 1.

En esta validación se busca analizar los productos que se realizan sin órdenes de clientes, es decir las variables y_{prt} . En particular, se considera la situación en que los clientes solicitan únicamente manteca para el primer periodo y el factor de conversión de la leche entera es mayor que el de la descremada. Por lo tanto, para poder cumplir con la demanda del cliente, se espera que el valor de la variable y_{prt} sea de leche descremada, debido a que al producir leche descremada se deja mayor cantidad de grasa para procesar manteca. Como se puede observar a continuación, las variables toman el valor según lo esperado.

Tabla 18: Modelo de Planificación - Parámetros y Variables del caso de validación 4.

| PARÁMETROS | | | |
|-----------------|------------------|------------------|------------|
| DM_{pc} | Salto | $ConvL_a$ | x_{cps} |
| Manteca | 100 | Leche Entera | 0,9 |
| | | Leche Descremada | 0,8 |
| VARIABLES | | | |
| Cliente (c) | Producto (p) | Período (t) | x_{cpts} |
| Salto | Manteca | 1 | 100 |

Tabla 20: Modelo de Planificación - Parámetros y Variables del caso de validación 6.

| PARÁMETROS | | |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| | | |
| Período (t) | L_t | |
| 1 | 1000 | |
| 2 | 1000 | |
| 3 | 1000 | |
| 4 | 1000 | |
| 5 | 1000 | |
| 6 | 1000 | |
| 7 | 1000 | |
| | | |
| Producto (a) | | $ConvL_a$ |
| Leche Entera | | 0,8 |
| Leche Descremada | | 0,8 |
| | | |
| Producto (b) | | $ConvC_b$ |
| Manteca | | 0,5 |
| Crema Doble | | 0,9 |
| | | |
| DM_{pc} | Colonia | Salto |
| Leche Entera | 1000 | 1000 |
| Leche Descremada | 1000 | 1000 |
| Crema Doble | 500 | 500 |
| Manteca | 500 | 500 |

Descremando los 7000 litros de leche que recibe la fábrica, se obtienen 1.120L de Crema de Leche. De acuerdo con los factores de conversión ($ConvC_b$) esta cantidad es insuficiente para producir lo demandado de manteca y crema de leche.

Anexo III: Pruebas de Estrés

5. Prueba de Estrés

A continuación, se presentan en detalle las pruebas de estrés mencionadas en la Sección 5.2. En la primera de ellas, se fija la cantidad de fábricas y clientes, variando la cantidad de tambos. En la segunda, lo que varía es la cantidad de clientes, mientras que se fija la cantidad de tambos y fábricas. Para el análisis, se considera una cantidad fija de productos y las respectivas tareas para su producción.

5.1. Tambos

Para esta prueba se consideraron 5 fábricas y 10 clientes. En Uruguay, se estima que hay alrededor de 3300 productores lecheros, de los cuales el 73% envía leche a la industria, lo que equivale a aproximadamente 2400 tambos. En este análisis, se hace variar la cantidad de tambos desde 100 hasta 2400.

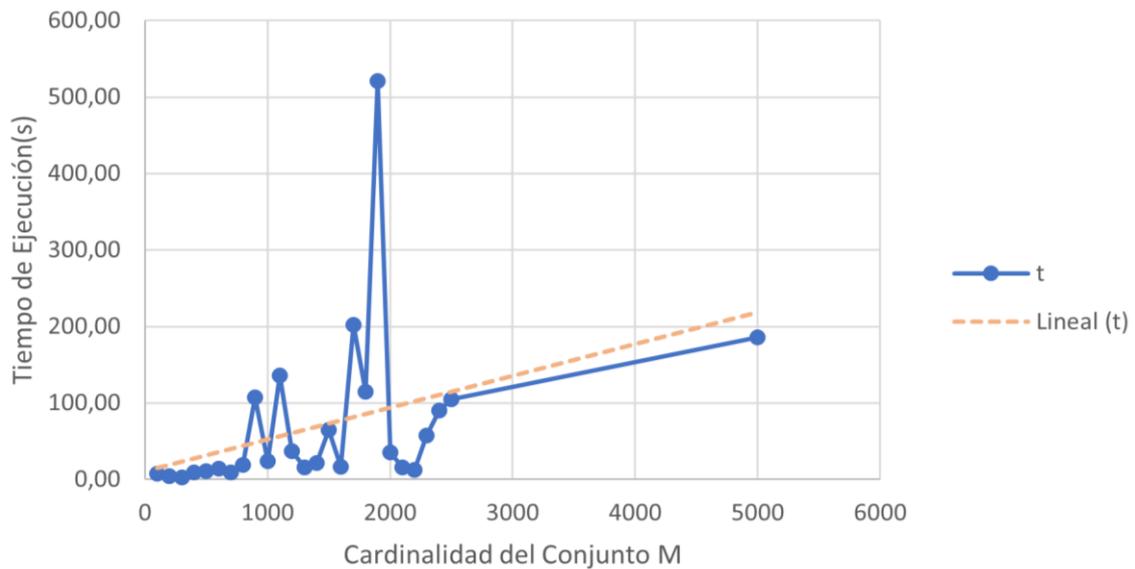


Figura 1: Prueba de Estrés - Cardinalidad M vs. Tiempo de ejecución

Cómo se puede ver en la Figura 1, si bien al aumentar la cardinalidad del conjunto M el tiempo de ejecución no necesariamente aumenta, se puede observar una tendencia creciente. Para los casos de estudio el tiempo de ejecución máximo fue de aproximadamente 10 minutos. Se concluye que los tiempos ejecución en la resolución del modelo de asignación planteado no superará los 10 minutos, si se consideran hasta 5000 tambos.

5.2. Clientes

Para el presente estudio, se consideraron 5 fábricas y 100 tambos. Se comenzó a analizar los tiempos de ejecución para 100 clientes hasta llegar a 45.000. En la Figura 2, muestra los resultados obtenidos con hasta 15.000 clientes para que se puedan visualizar los casos estudiados. Se puede observar una tendencia creciente en los tiempos de ejecución con un máximo de aproximadamente 5 minutos.

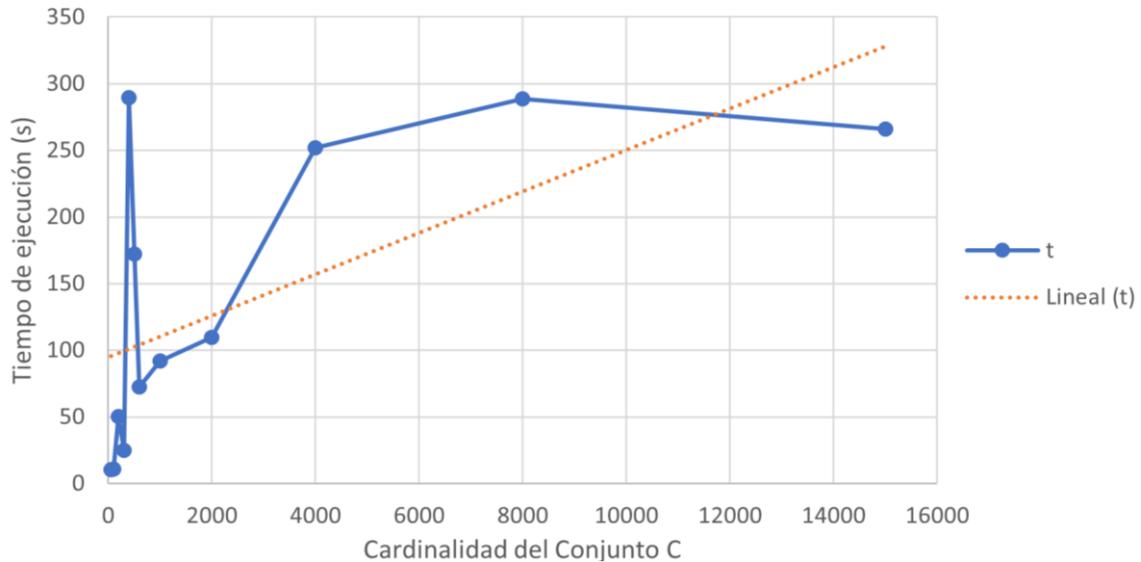


Figura 2: Prueba de Estrés - Cardinalidad C vs. Tiempo de ejecución

El tiempo de ejecución para 45.000 clientes fue de 9 horas y 20 minutos aproximadamente. De este estudio se concluye que los tiempos de ejecución se mantienen en rangos razonables, para cantidades menores a 45.000 clientes.

Anexo IV: Resultados Obtenidos

1. Modelo de Asignación

1.1. Conjuntos y Parámetros

| Tambos (m) | L_m |
|-----------------------|-------------------------|
| T1 | 23713 |
| T2 | 29888 |
| T3 | 21627 |
| T4 | 24203 |
| T5 | 21634 |
| T6 | 28236 |
| T7 | 27622 |
| T8 | 22048 |
| T9 | 22621 |
| T10 | 20662 |
| T11 | 23138 |
| T12 | 27715 |
| T13 | 29687 |
| T14 | 29918 |
| T15 | 29741 |
| T16 | 29602 |
| T17 | 22046 |
| T18 | 26339 |
| T19 | 22546 |
| T20 | 23049 |
| T21 | 22210 |
| T22 | 27038 |
| T23 | 24136 |
| T24 | 21925 |
| T25 | 20444 |
| T26 | 23980 |
| T27 | 21251 |
| T28 | 22207 |
| T29 | 26394 |
| T30 | 28970 |

| | |
|-----------|-------|
| QT | 25000 |
| QF | 14000 |
| QC | 14000 |

| dMS_{ms} | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| T1 | 154 | 274 | 256 | 33 | 74 |
| T2 | 248 | 379 | 75 | 327 | 353 |
| T3 | 91 | 316 | 241 | 45 | 136 |
| T4 | 200 | 263 | 276 | 78 | 37 |
| T5 | 315 | 65 | 257 | 252 | 196 |
| T6 | 48 | 56 | 373 | 340 | 278 |
| T7 | 332 | 89 | 319 | 313 | 258 |
| T8 | 100 | 235 | 178 | 125 | 316 |
| T9 | 148 | 219 | 198 | 71 | 97 |
| T10 | 113 | 280 | 247 | 30 | 120 |
| T11 | 154 | 274 | 263 | 30 | 74 |
| T12 | 174 | 453 | 206 | 266 | 357 |
| T13 | 208 | 497 | 166 | 298 | 389 |
| T14 | 113 | 268 | 115 | 174 | 242 |
| T15 | 267 | 501 | 181 | 373 | 464 |
| T16 | 190 | 321 | 0 | 269 | 295 |
| T17 | 224 | 215 | 157 | 242 | 269 |
| T18 | 398 | 271 | 330 | 416 | 442 |
| T19 | 420 | 94 | 408 | 376 | 313 |
| T20 | 200 | 476 | 188 | 289 | 380 |
| T21 | 349 | 566 | 245 | 438 | 241 |
| T22 | 308 | 527 | 169 | 393 | 491 |
| T23 | 57 | 370 | 165 | 194 | 262 |
| T24 | 243 | 123 | 271 | 166 | 103 |
| T25 | 163 | 204 | 213 | 86 | 91 |
| T26 | 137 | 420 | 197 | 237 | 329 |
| T27 | 335 | 326 | 108 | 353 | 380 |
| T28 | 17 | 329 | 173 | 130 | 221 |
| T29 | 155 | 227 | 97 | 175 | 201 |
| T30 | 289 | 602 | 285 | 403 | 494 |

| dSC_{sc} | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| C1 | 39 | 375 | 209 | 150 | 238 |
| C2 | 39 | 375 | 209 | 150 | 238 |
| C3 | 39 | 375 | 209 | 150 | 238 |
| C4 | 39 | 375 | 209 | 150 | 238 |
| C5 | 39 | 375 | 209 | 150 | 238 |
| C6 | 39 | 375 | 209 | 150 | 238 |
| C7 | 39 | 375 | 209 | 150 | 238 |
| C8 | 167 | 480 | 263 | 275 | 367 |
| C9 | 166 | 480 | 263 | 275 | 366 |
| C10 | 162 | 475 | 258 | 270 | 362 |
| C11 | 134 | 448 | 230 | 243 | 335 |
| C12 | 423 | 375 | 213 | 483 | 490 |
| C13 | 150 | 184 | 138 | 132 | 158 |
| C14 | 146 | 420 | 197 | 237 | 329 |
| C15 | 233 | 547 | 330 | 342 | 434 |
| C16 | 314 | 377 | 169 | 404 | 495 |
| C17 | 470 | 345 | 402 | 488 | 514 |
| C18 | 360 | 233 | 292 | 378 | 404 |
| C19 | 585 | 257 | 572 | 540 | 476 |
| C20 | 448 | 120 | 435 | 402 | 339 |
| C21 | 335 | 0 | 322 | 289 | 226 |
| C22 | 243 | 123 | 271 | 166 | 103 |
| C23 | 55 | 283 | 206 | 81 | 173 |
| C24 | 55 | 383 | 194 | 169 | 260 |
| C25 | 55 | 383 | 194 | 169 | 260 |
| C26 | 15 | 326 | 174 | 127 | 219 |
| C27 | 166 | 299 | 317 | 45 | 77 |
| C28 | 82 | 365 | 142 | 183 | 274 |
| C29 | 261 | 575 | 357 | 370 | 462 |
| C30 | 227 | 226 | 295 | 105 | 0 |

| dSS_{sk} | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| F1 | 0 | 335 | 188 | 136 | 225 |
| F2 | 335 | 0 | 321 | 289 | 229 |
| F3 | 188 | 321 | 0 | 269 | 304 |
| F4 | 136 | 289 | 269 | 0 | 105 |
| F5 | 225 | 229 | 304 | 105 | 0 |

| MC_{ps} | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|------------------|------|------|----|------|----|
| Leche Entera | 20,2 | 28 | 18 | 22,1 | 16 |
| Leche Descremada | 20,2 | 28 | 18 | 22,1 | 16 |
| Crema Doble | 62,1 | 77,5 | 50 | 0 | 0 |
| Manteca | 137 | 160 | 0 | 145 | 0 |

| $MT_{p,F1,r}$ | Descremado | Homogeneizado | Pasteurizado | Batido | Envasado Leche | Envasado Crema Doble | Envasado Manteca |
|------------------|------------|---------------|--------------|--------|----------------|----------------------|------------------|
| Leche Entera | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0 | 0,02 | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0 | 0,02 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 0 | 0,07 | 0,07 | 0 | 0 | 0,06 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 0,156 | 0,48 | 0 | 0 | 0,48 |

| $MT_{p,F2,r}$ | Descremado | Homogeneizado | Pasteurizado | Batido | Envasado Leche | Envasado Crema Doble | Envasado Manteca |
|------------------|------------|---------------|--------------|--------|----------------|----------------------|------------------|
| Leche Entera | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 0 | 0,04 | 0,04 | 0 | 0 | 0,05 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 0,089 | 0,35 | 0 | 0 | 0,35 |

| $MT_{p,F3,r}$ | Descremado | Homogeneizado | Pasteurizado | Batido | Envasado Leche | Envasado Crema Doble | Envasado Manteca |
|------------------|------------|---------------|--------------|--------|----------------|----------------------|------------------|
| Leche Entera | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0 | 0,02 | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0 | 0,025 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 0 | 0,075 | 0,075 | 0 | 0 | 0,065 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| $MT_{p,F4,r}$ | Descremado | Homogeneizado | Pasteurizado | Batido | Envasado Leche | Envasado Crema Doble | Envasado Manteca |
|------------------|------------|---------------|--------------|--------|----------------|----------------------|------------------|
| Leche Entera | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0 | 0,015 | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0 | 0,015 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 0,133 | 0,4 | 0 | 0 | 0,4 |

| $MT_{p,F5,r}$ | Descremado | Homogeneizado | Pasteurizado | Batido | Envasado Leche | Envasado Crema Doble | Envasado Manteca |
|------------------|------------|---------------|--------------|--------|----------------|----------------------|------------------|
| Leche Entera | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| $TSU_{p,F1,r}$ | Descremado | Homogeneizado | Pasteurizado | Batido | Envasado Leche | Envasado Crema Doble | Envasado Manteca |
|------------------|------------|---------------|--------------|--------|----------------|----------------------|------------------|
| Leche Entera | 35 | 35 | 35 | 0 | 50 | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 35 | 35 | 35 | 0 | 50 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 0 | 35 | 35 | 0 | 0 | 50 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 35 | 50 | 0 | 0 | 10 |

| $TSU_{p,F2,r}$ | Descremado | Homogeneizado | Pasteurizado | Batido | Envasado Leche | Envasado Crema Doble | Envasado Manteca |
|------------------|------------|---------------|--------------|--------|----------------|----------------------|------------------|
| Leche Entera | 25 | 25 | 25 | 0 | 40 | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 25 | 25 | 25 | 0 | 40 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 0 | 25 | 25 | 0 | 0 | 40 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 25 | 40 | 0 | 0 | 10 |

| $TSU_{p,F3,r}$ | Descremado | Homogeneizado | Pasteurizado | Batido | Envasado Leche | Envasado Crema Doble | Envasado Manteca |
|------------------|------------|---------------|--------------|--------|----------------|----------------------|------------------|
| Leche Entera | 40 | 40 | 40 | 0 | 55 | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 40 | 40 | 40 | 0 | 55 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 0 | 40 | 40 | 0 | 0 | 55 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| $TSU_{p,F4,r}$ | Descremado | Homogeneizado | Pasteurizado | Batido | Envasado Leche | Envasado Crema Doble | Envasado Manteca |
|------------------|------------|---------------|--------------|--------|----------------|----------------------|------------------|
| Leche Entera | 30 | 30 | 30 | 0 | 45 | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 30 | 30 | 30 | 0 | 45 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 30 | 20 | 0 | 0 | 10 |

| $TSU_{p,F5,r}$ | Descremado | Homogeneizado | Pasteurizado | Batido | Envasado Leche | Envasado Crema Doble | Envasado Manteca |
|------------------|------------|---------------|--------------|--------|----------------|----------------------|------------------|
| Leche Entera | 45 | 45 | 45 | 0 | 60 | 0 | 0 |
| Leche Descremada | 45 | 45 | 45 | 0 | 60 | 0 | 0 |
| Crema Doble | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Manteca | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| DM_{pc} | Leche Entera | Leche Descremada | Crema Doble | Manteca |
|-----------|--------------|------------------|-------------|---------|
| C1 | 10679 | 14112 | 316 | 166 |
| C2 | 13231 | 11449 | 324 | 123 |
| C3 | 11404 | 0 | 324 | 281 |
| C4 | 0 | 11085 | 299 | 0 |
| C5 | 10820 | 14556 | 306 | 0 |
| C6 | 13838 | 13320 | 309 | 135 |
| C7 | 13947 | 11902 | 286 | 154 |
| C8 | 10983 | 12681 | 322 | 155 |
| C9 | 10289 | 0 | 304 | 178 |
| C10 | 11547 | 13126 | 321 | 0 |
| C11 | 0 | 13772 | 302 | 192 |
| C12 | 11511 | 12509 | 322 | 201 |
| C13 | 11448 | 10638 | 328 | 171 |
| C14 | 13199 | 14018 | 309 | 0 |
| C15 | 13050 | 11385 | 280 | 198 |
| C16 | 10563 | 13247 | 284 | 298 |
| C17 | 10997 | 0 | 316 | 206 |
| C18 | 11520 | 13594 | 320 | 0 |
| C19 | 12717 | 10237 | 328 | 260 |
| C20 | 13893 | 12973 | 320 | 183 |
| C21 | 14833 | 11816 | 327 | 212 |
| C22 | 14125 | 14768 | 297 | 227 |
| C23 | 0 | 11772 | 310 | 0 |
| C24 | 13873 | 10287 | 302 | 141 |
| C25 | 12713 | 11620 | 327 | 190 |
| C26 | 13764 | 13947 | 313 | 271 |
| C27 | 0 | 13901 | 284 | 183 |
| C28 | 11127 | 10861 | 328 | 108 |
| C29 | 13695 | 13120 | 303 | 0 |
| C30 | 14242 | 14517 | 298 | 136 |

1.2. Variables

| $x_{cp,F2}$ | Leche Entera | Leche Descremada | Crema Doble | Manteca |
|-------------|--------------|------------------|-------------|---------|
| C1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C12 | 0 | 12509 | 0 | 201 |
| C13 | 0 | 10638 | 328 | 171 |
| C14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C16 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C17 | 10997 | 0 | 316 | 206 |
| C18 | 11520 | 13594 | 320 | 0 |
| C19 | 12717 | 10237 | 328 | 260 |
| C20 | 13893 | 12973 | 320 | 183 |
| C21 | 14833 | 11816 | 327 | 212 |
| C22 | 0 | 0 | 297 | 227 |
| C23 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C24 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C26 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C27 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C28 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C29 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C30 | 0 | 0 | 298 | 136 |

| $x_{cp,F3}$ | Leche Entera | Leche Descremada | Crema Doble | Manteca |
|-------------|--------------|------------------|-------------|---------|
| C1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C10 | 0 | 13126 | 321 | 0 |
| C11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C12 | 11511 | 0 | 322 | 0 |
| C13 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C14 | 13199 | 14018 | 309 | 0 |
| C15 | 13050 | 0 | 280 | 0 |
| C16 | 0 | 13247 | 284 | 0 |
| C17 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C19 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C20 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C21 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C22 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C23 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C24 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C26 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C27 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C28 | 11127 | 0 | 328 | 0 |
| C29 | 13695 | 0 | 303 | 0 |
| C30 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| $x_{cp,F4}$ | Leche Entera | Leche Descremada | Crema Doble | Manteca |
|-------------|--------------|------------------|-------------|---------|
| C1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C2 | 13231 | 0 | 0 | 0 |
| C3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C5 | 10820 | 14556 | 0 | 0 |
| C6 | 13838 | 0 | 0 | 0 |
| C7 | 13947 | 0 | 0 | 0 |
| C8 | 10983 | 0 | 0 | 0 |
| C9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C10 | 11547 | 0 | 0 | 0 |
| C11 | 0 | 13772 | 0 | 0 |
| C12 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C13 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C15 | 0 | 11358 | 0 | 198 |
| C16 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C17 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C19 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C20 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C21 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C22 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C23 | 0 | 11772 | 0 | 0 |
| C24 | 13873 | 0 | 0 | 0 |
| C25 | 12713 | 0 | 0 | 0 |
| C26 | 13764 | 13947 | 0 | 0 |
| C27 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C28 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C29 | 0 | 13120 | 0 | 0 |
| C30 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| $x_{cp,F5}$ | Leche Entera | Leche Descremada | Crema Doble | Manteca |
|-------------|--------------|------------------|-------------|---------|
| C1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C12 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C13 | 11448 | 0 | 0 | 0 |
| C14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C16 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C17 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C19 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C20 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C21 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C22 | 14125 | 14768 | 0 | 0 |
| C23 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C24 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C26 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C27 | 0 | 13901 | 0 | 0 |
| C28 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C29 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C30 | 14242 | 14517 | 0 | 0 |

| Fábrica (s) | c_s |
|-------------|---------|
| F1 | 13412,4 |
| F2 | 6080,67 |
| F3 | 2960,14 |
| F4 | 8504,63 |
| F5 | 2849,8 |

2. Modelo de Planificación

2.1. Parámetros

| Período (t) | L_t |
|-------------|-------|
| 1 | 22229 |
| 2 | 22229 |
| 3 | 22229 |
| 4 | 22229 |
| 5 | 22229 |
| 6 | 22229 |
| 7 | 22229 |

| Período (t) | CL_t |
|-------------|---------|
| 1 | 8064,63 |
| 2 | 0 |
| 3 | 0 |
| 4 | 0 |
| 5 | 0 |
| 6 | 0 |
| 7 | 0 |

2.2. Variables

| Período (t) | cl_t |
|-------------|---------|
| 1 | 1823,31 |
| 2 | 2041,25 |
| 3 | 2041,25 |
| 4 | 1808,52 |
| 5 | 1831,27 |
| 6 | 1825,68 |
| 7 | 2041,19 |