

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
LOMAS DE ZAMORA

TESIS DOCTORAL



Modelado para la Medición y Gestión de la Complejidad en Sistemas de Manufactura

Autor:

Ing. Germán Herrera Vidal

Director:

Dr. Ing. Jairo Rafael Coronado Hernández

Co-director:

Dra. Lic. Claudia Minnaard

Doctorado en Ingeniería
Facultad de Ingeniería

Buenos Aires, Argentina
Mayo de 2022

Dr. Jairo Rafael Coronado Hernández, Doctor en Ingeniería y Producción Industrial. Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería Industrial en la Universidad de la Costa, Barranquilla - Colombia

AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada:

Modelado para la Medición y Gestión de la Complejidad en Sistemas de Manufactura

Realizada por **Ing. Germán Herrera Vidal** bajo su inmediata dirección y supervisión y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

En Lomas de Zamora, 15 Mayo de 2022.

Dr. Jairo Rafael Coronado Hernández

Dra. Claudia Minnaard, Doctora en Educación - Magister en Metodología de la Investigación Científica - Especialista en Educación y Nuevas Tecnologías - Licenciada en Pedagogía de la Matemática. Profesora de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora – Argentina.

AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada:

Modelado para la Medición y Gestión de la Complejidad en Sistemas de Manufactura

Realizada por **Ing. Germán Herrera Vidal** bajo su inmediata dirección y supervisión y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

En Lomas de Zamora, 15 Mayo de 2022.

Dra. Claudia Minnaard

Dedicado a

A mi esposa, Kelly Johanna y A mis hijos,
Jesús David y Thiana Luz,
Por quienes lucho por superarme
En memoria de mi madre, Mariela Vidal,
Por ser ejemplo de vida,
Gracias Madre.

Resumen

El entorno empresarial es cada vez más complejo y competitivo por lo que las organizaciones deben buscar mecanismos que les permitan desarrollar nuevas estrategias, nuevos mecanismos de medición y competir con éxito. Esta tesis doctoral tiene como objetivo, diseñar un modelo para la medición y gestión de la complejidad en sistemas de manufactura de los distintos subsectores económicos, que facilite el proceso de gerenciamiento y asertividad en las decisiones. Enmarcado metodológicamente desde tres vectores como la identificación, medición y la gestión. La investigación se fundamenta inicialmente en una revisión de la literatura, la cual permitió estudiar la complejidad en sistemas de manufactura de manera amplia y concreta, a partir de mecanismos sistemáticos que lograron entender sobre la conceptualización, tipificación, fuentes de complejidad, los distintos enfoques y métodos, y por último los modelos que se pueden utilizar para su análisis. Luego se desarrolló un estudio fundamentado en un instrumento de la Universidad de Bayreuth de manera integral en el sector de manufactura en la ciudad de Cartagena – Colombia, tomando como muestra las pequeñas y medianas empresas (Pyme) en la industria manufacturera, lo que permitió reducir la brecha entre la fundamentación teórica existente y los proyectos prácticos aplicados. Consecuente a esto, se diseñó un modelo conceptual y se propuso una nueva métrica entrópica e híbrida, aplicando modelos matemáticos y describiendo cada uno de los pasos para un mayor entendimiento procedimental. Todo gracias al análisis previo desarrollado y la identificación de inconvenientes o deficiencias en las métricas clásicas y extendidas. Su validación se hizo de forma práctica inicialmente siendo evaluado y analizado en laboratorio y después tomando como base la información y parámetros suministrados por las empresas participantes. A cabo se llevaron procesos específicos de gestión de la complejidad en sistemas de manufactura, a partir del modelamiento matemático con técnicas de optimización, los cuales permitieron encontrar el mejor rendimiento a las funciones objetivos y óptima respuesta a las variables de decisión. Los hallazgos también evidenciaron el cálculo de medidas de complejidad estática y dinámica, los cuales sirvieron de referencia para focalizar procesos de mejora, que permiten gestionar, reducir o eliminar la alta complejidad tanto en estaciones de trabajo, productos, procesos de fabricación y variables aleatorias que generan incertidumbre en el sistema. Al final se pudo concluir que el modelo propuesto puede ser aplicado y adaptado a cualquier caso, independientemente del sector ya que tiene en cuenta variables críticas de decisión.

Agradecimientos

A Dios por brindarme fortalezas en momentos difíciles y sabiduría para ser asertivo en la toma de decisiones.

Al Dr. Jairo Rafael Coronado Hernández, por encaminarme en esta temática investigativa, por sus aportes, sus relaciones y su paciencia en el desarrollo de este trabajo.

A la Dra. Claudia Minnaard, por aceptar codirigir mi tesis doctoral y brindar sus conocimientos amplios en estadística y análisis de datos.

A los miembros de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Lomas de Zamora – Argentina, por el soporte académico y permitir el alcance de esta meta.

Índice general

	Pág.
1	Capítulo 1. Introducción General 17
1.1	Justificación e interés de la temática 19
1.2	Cuestiones de la investigación 21
1.3	Objetivos de la investigación 21
1.4	Hipótesis para la investigación 22
1.5	Principal aporte de la tesis 22
1.6	Organización de la tesis 25
1.7	Metodología de la investigación 26
2	Capítulo 2. Revisión de la Literatura 28
2.1	Objetivo 28
2.2	Definición de Complejidad 28
2.3	Campos científicos de interés de la complejidad 29
2.4	Complejidad en sistemas de manufactura 29
2.5	Tipificación de la complejidad en sistemas de manufactura 31
2.6	Fuentes de complejidad en sistemas de manufactura 33
2.7	Medición de la complejidad en sistemas de manufactura 35
2.8	Consideraciones para la medición de la complejidad en manufactura 36
2.9	Aspectos relevantes en la medición de la complejidad en manufactura 37
2.10	Métodos y enfoques para medir la complejidad en sistemas de manufactura 40
2.10.1	Teoría del caos y la dinámica no lineal 40
2.10.2	Teoría de la información 42
2.10.3	Índice cuantitativo 44
2.10.4	Enfoque híbrido 44
2.10.5	Otros enfoques 46
2.11	Análisis entre los métodos y enfoques 46
2.12	Tipos de modelos más destacados para medir la complejidad 48
2.13	Conclusiones del capítulo 50
3	Capítulo 3. Efectos y factores de complejidad en sistemas de manufactura 52
3.1	Objetivo 52
3.2	Introducción 52
3.3	La complejidad en sistemas de manufactura 53
3.4	Metodología 54
3.4.1	Estudio del sector manufacturero 55
3.4.2	Análisis sectorial de la complejidad 58
3.4.3	Identificación de los efectos de la complejidad 61
3.4.4	Factores de generación de complejidad 63
3.4.5	Identificación de métodos de mejora 63
3.5	Conclusiones del capítulo 64
4.	Capítulo 4. Análisis estadístico de la complejidad en sistema de manufactura 66
4.1	Objetivo 66
4.2	Introducción 66
4.3	Hipótesis 68
4.4	Metodología 68

4.4.1	Tipo y método de investigación	69
4.4.2	Fuente y técnica de recolección de información	69
4.4.3	Población, muestra y tratamiento de la información	70
4.4.4	Ficha técnica propuesta	70
4.4.5	Técnica aplicada de estudio	71
4.4.6	Análisis estadístico de validación y consistencia	73
4.4.7	Análisis estadístico experimental	73
4.4.8	Análisis estadístico factorial	75
4.4.9	Análisis de asociatividad de la complejidad	77
4.5	Conclusiones del capítulo	79
5	Capítulo 5. Modelamiento y análisis de la complejidad en sistemas de manufactura	80
5.1	Objetivo	80
5.2	Hipótesis	80
5.3	Consideraciones para el modelamiento	80
5.4	Modelización estructural de los sistemas	81
5.5	Medición de la complejidad estática y dinámica	83
5.6	Análisis estadístico experimental y factorial	90
5.7	Conclusiones del capítulo	94
6	Capítulo 6. Modelo conceptual y métrica para la medición de la complejidad en sistema de manufactura	95
6.1	Objetivo	95
6.2	Hipótesis	95
6.3	Introducción	95
6.4	Consideraciones para el diseño del modelo conceptual	96
6.5	Modelo conceptual	97
6.5.1	Modelo conceptual – Vista física	97
6.5.2	Modelo conceptual – Vista funcional	99
6.5.3	Modelo conceptual – Vista informacional	106
6.6	Evaluación y análisis del modelo conceptual	107
6.6.1	Caso práctico de estudio	107
6.6.2	Evaluación del método índice de complejidad (CXI)	109
6.6.3	Evaluación del método entropía de Shannon (SE)	110
6.6.4	Evaluación del método híbrido (H)	115
6.7	Conclusiones del capítulo	116
7	Capítulo 7. Aplicación del modelo en sistema Flow shop (FS) y Make to Stock (MTS)	117
7.1	Objetivo	117
7.2	Caso de aplicación	117
7.2.1	Generalidades de la empresa	117
7.2.2	Proceso de manufactura	118
7.3	Características del sistema a modelar	119
7.4	Parámetros para el modelamiento	120
7.4.1	Datos del instrumento aplicado	120
7.4.2	Datos de la programación estática por estaciones	121
7.4.3	Datos de la programación dinámica por estaciones	122
7.4.4	Datos reales de la variable demanda de los productos	123
7.4.5	Datos previstos de la variable demanda de los productos	124
7.5	Resultados y análisis del modelo	125

7.5.1	Resultados de acuerdo a programación en estaciones de trabajo	125
7.5.2	Resultados de acuerdo a estimaciones en variables del sistema	127
7.6	Conclusiones del capítulo	128
8	Capítulo 8. Aplicación del modelo en sistema Job Shop (JS) y Make to Order (MTO)	129
8.1	Objetivo	129
8.2	Caso de aplicación	129
8.2.1	Generalidades de la empresa	129
8.2.2	Proceso de manufactura	129
8.3	Característica del sistema a modelar	130
8.4	Parámetros para el modelamiento	130
8.4.1	Datos del instrumento aplicado	131
8.4.2	Datos de información estática según el proceso	131
8.4.3	Datos de información dinámica según el proceso	131
8.4.4	Datos reales de la variable horas de mantenimiento	132
8.5	Resultados y análisis del modelo	133
8.5.1	Resultados de acuerdo a los distintos procesos	133
8.5.2	Resultados de acuerdo a estimaciones en variables del sistema	135
8.6	Conclusiones del capítulo	135
9	Capítulo 9. Gestión de la complejidad en sistemas de manufactura	136
9.1	Objetivo	136
9.2	Introducción	136
9.3	Proyectos alineados de investigación	136
9.4	Descripción del primer proyecto	137
9.4.1	Título	137
9.4.2	Resumen	137
9.4.3	Descripción del problema	137
9.4.4	Estrategia de solución	138
9.4.5	Conclusiones	138
9.5	Descripción del segundo proyecto	139
9.5.1	Título	139
9.5.2	Resumen	139
9.5.3	Descripción del problema	139
9.5.4	Estrategia de solución	139
9.5.5	Conclusiones	141
9.6	Conclusiones del capítulo	141
10	Capítulo 10. Conclusiones Generales	142
10.1	Introducción	142
10.2	Contribuciones	142
10.3	Conclusiones finales	143
10.4	Trabajos futuros	145
	Bibliografía	146
	Anexos	161
	Anexo 1: Formato encuesta para método Índice de complejidad (CXI)	161
	Anexo 2: Programación simulación con ProModel modelo H	166
	Anexo 3: Programación simulación con ProModel modelo caso estudio	170
	Anexo 4: Calculo de la complejidad estática en sistema Flow Shop (FS) y Make to Stock (MTS)	173

Anexo 5: Calculo de la complejidad dinámica en sistema Flow Shop (FS) y Make to Stock (MTS)	174
Anexo 6: Calculo de la complejidad estática en sistema Job Shop (FS) y Make to Order (MTO)	175
Anexo 7: Calculo de la complejidad dinámica en sistema Job Shop (FS) y Make to Order (MTO)	176
Anexo 8: Calculo de la complejidad por medio método híbrido en sistema Job Shop (FS) y Make to Order (MTO)	178

Índice de figuras

	Pág	
Figura 1.	Número de publicaciones por año	20
Figura 2.	Esquema metodológico de la investigación	27
Figura 3	Aspectos de importancia de la medición de la complejidad	35
Figura 4	Volumen de publicaciones por año en base de datos	37
Figura 5.	Espectro de investigaciones futuras hacia la medición de la complejidad	39
Figura 6.	Relación de palabras más relevantes en la medición de la complejidad de sistemas manufactura	39
Figura 7.	Comparación de diferentes tipos de enfoque	47
Figura 8.	Comparación de diferentes tipos de elementos	48
Figura 9.	Comparación entre los diferentes tipos de modelos	50
Figura 10.	Complejidad de acuerdo al origen	53
Figura 11.	Complejidad de acuerdo al tiempo y su comportamiento	54
Figura 12.	Metodología propuesta para el estudio de efectos y factores de complejidad	55
Figura 13.	Variación del índice de producción industrial por sectores industriales a 2019	56
Figura 14.	Proporción de empresas seleccionadas por subsector	57
Figura 15.	Formato de encuesta para estudio sectorial	58
Figura 16.	Resultados tabulados del análisis del sector	59
Figura 17.	Formato de estudio de complejidad sectorial en sistemas de manufactura	60
Figura 18.	Palabras más relevantes en base de datos	67
Figura 19.	Metodología propuesta para el análisis estadístico de la complejidad	68
Figura 20.	Formato de encuesta de complejidad para sistemas de manufacturas	69
Figura 21.	Grafica de Likert asociada a la complejidad	73
Figura 22.	Graficas de medias de los factores	75
Figura 23.	Matriz de correlación de variables	76
Figura 24.	Estructura Flow Shop e Hibrido	81
Figura 25.	Tipos de estructuras para el modelamiento	83
Figura 26.	Resultados de los indicadores de desempeño	84
Figura 27.	Estructura para la aplicación de métricas	86
Figura 28.	Layout del modelo de simulación en ProModel – Escenario H	87
Figura 29.	Resultados del cálculo de complejidad estática y dinámica	90
Figura 30.	Grafica de medias entre el factor diseño estructural y tiempo de producción	92
Figura 31.	Matriz de correlación de indicadores de desempeño para Ct	93
Figura 32.	Matriz de correlación de indicadores de desempeño para Cs y Cd	94
Figura 33.	Propuesta de modelo conceptual	98
Figura 34.	Estructura para la aplicación de nueva métrica propuesta	102
Figura 35.	Foto practica en laboratorio de caso de manufactura	108
Figura 36.	Representación gráfica del sistema de manufactura	108
Figura 37.	Índice de complejidad por elemento	109

Figura 38.	Programación de trabajo por estaciones	110
Figura 39.	Simulación de la programación de la estación A	112
Figura 40.	Simulación de la programación de la estación B	112
Figura 41.	Simulación de la programación de la estación C	112
Figura 42.	Análisis comparativo de los resultados obtenidos	116
Figura 43.	Diagrama de flujo del proceso	118
Figura 44.	Representación del sistema Flow Shop y Make To Stock	119
Figura 45.	Recogida de datos e información en caso de estudio Flow Shop y Make To Stock	120
Figura 46.	Información de programación estática de trabajo por estaciones	121
Figura 47.	Información de programación dinámica por estaciones	122
Figura 48.	Resultado del CXIe por elementos evaluados	125
Figura 49.	Resultado entrópico de la complejidad estática y dinámica	126
Figura 50.	Resultado del método híbrido de la complejidad estática y dinámica	127
Figura 51.	Resultado del nuevo método propuesto de la complejidad estática y dinámica	127
Figura 52.	Representación del sistema Job Shop y Make To Order	130
Figura 53.	Recogida de datos e información en caso de estudio Job Shop y Make To Order	131
Figura 54.	Resultado del CXIe por elementos evaluados y total CXI	133
Figura 55.	Resultado entrópico de la complejidad estática y dinámica	134
Figura 56.	Resultado del método híbrido de la complejidad estática y dinámica	134
Figura 57.	Resultado del nuevo método propuesto de la complejidad estática y dinámica	135

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1. Revisión de estudios de la complejidad en diferentes disciplinas	30
Tabla 2. Revisión de tipos de complejidad en sistemas de manufactura	32
Tabla 3. Revisión de fuentes de la complejidad en sistemas de manufactura	33
Tabla 4. Estrategias de gestión para la solución de la complejidad	34
Tabla 5. Metodologías y herramientas de gestión para la solución en sistemas de manufactura	34
Tabla 6. Consideraciones en la medición de la complejidad	36
Tabla 7. Relación de citaciones y elementos relevantes en la medición de sistemas de manufactura	38
Tabla 8. Relación y evaluación con respecto a la teoría del caos y la dinámica no lineal (DT)	41
Tabla 9. Relación y evaluación con respecto a la teoría de la información (TI)	43
Tabla 10. Relación de evaluación con respecto al índice cuantitativo (QI), híbrido (H) y otros enfoques (OA)	45
Tabla 11. Comparación de características entre métodos y enfoques	46
Tabla 12. Comparación de diferentes características entre enfoques	47
Tabla 13. Relación y evaluación de tipos de modelos respecto a los tipos de complejidad	49
Tabla 14. Clasificación de las empresas en Colombia	56
Tabla 15. Participación de empresas manufactureras en la ciudad de Cartagena	57
Tabla 16. Efectos relevantes en los distintos sectores económicos	61
Tabla 17. Efectos de la complejidad seleccionados	62
Tabla 18. Efectos más representativos en cada uno de los subsectores y los elementos	62
Tabla 19. Matriz de identificación de factores de complejidad	63
Tabla 20. Identificación de métodos de mejora	64
Tabla 21. Relación y descripción de indicadores de gestión	65
Tabla 22. Metadatos de la técnica aplicada	70
Tabla 23. Relación de autores con aplicación de técnica de cuestionarios	71
Tabla 24. Medida de tendencia central de la complejidad en sistema de manufactura	72
Tabla 25. Análisis de varianza para la alta complejidad	74
Tabla 26. Grupos de factores relevantes	76
Tabla 27. Análisis de extracción de componentes principales	77
Tabla 28. Análisis de resultados de la prueba chi-cuadrado	78
Tabla 29. Revisión de la literatura de casos de aplicación	82
Tabla 30. Relación de autores y métricas para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura	85
Tabla 31. Resultados de la medición de la complejidad estática – ambiente H8	88
Tabla 32. Resultados de las locaciones de la simulación para las estaciones en estructura H8	88
Tabla 33. Resultados de las entidades de la simulación en estructura H8	89
Tabla 34. Resultados de los estados de la simulación en estructura H8	89
Tabla 35. Resultado del análisis de varianza – Anova para la complejidad total	92
Tabla 36. Relación de autores y métrica clásica y extendida	100
Tabla 37. Comparación de características respecto al nuevo método	101

Tabla 38.	Determinación de las desviaciones absolutas de cada periodo	103
Tabla 39.	Cálculo de las probabilidades P_{ij} y las desviaciones promedio d_{ij}	104
Tabla 40.	Cálculo de los pesos ponderados por intervalos W_{ij}	104
Tabla 41.	Comparación de resultados de métricas entrópicas	105
Tabla 42.	Métricas híbridas para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura	106
Tabla 43.	Respuesta de los responsables por estación de trabajo	109
Tabla 44.	Cálculo de Índice de complejidad por estación	110
Tabla 45.	Cálculo de complejidad estática en estación A	111
Tabla 46.	Resultados de la medición de la complejidad estática	111
Tabla 47.	Simulación Montecarlo para la estación A	111
Tabla 48.	Resultados de la medición de la complejidad dinámica en la estación C	113
Tabla 49.	Resultados de la medición de la complejidad dinámica en la estación B	113
Tabla 50.	Resultados de la medición de la complejidad dinámica en la estación A	113
Tabla 51.	Resultados de la simulación con ProModel del caso estudio	114
Tabla 52.	Cálculo de complejidad estática y dinámica con método Híbrido	116
Tabla 53.	Datos del instrumento aplicado en cada área de trabajo	121
Tabla 54.	Datos históricos reales de la variable demanda por productos	123
Tabla 55.	Datos históricos previstos de la variable demanda por productos	124
Tabla 56.	Resultados del CXI por estaciones de trabajo	126
Tabla 57.	Datos del instrumento aplicado en cada área de trabajo	131
Tabla 58.	Información estática según el proceso	132
Tabla 59.	Información dinámica según el proceso	132
Tabla 60.	Información de la variable horas de mantenimiento	132

Capítulo 1

Introducción General

La manufactura es el proceso de agregar valor a un material para construir un producto [1]. El arte de la fabricación implica una secuencia repetitiva de operaciones. La fabricación requiere recursos que incluye una infraestructura de personas en una organización. [2] en su investigación establece para llevar a cabo un proceso de ingeniería fabril hay que tener en cuenta unas actividades como: (i) La escogencia del proceso, (ii) definición del método de trabajo y precedencias de las actividades, (iii) elección de las máquinas, (iv) elección de los equipos y herramientas, (v) Diseño de las instalaciones, (vi) Especificación de los tiempos tipos de cada estación de trabajo, (vii) Determinación del tipo de operaciones, (viii) Control de costos de manufactura, (ix) Investigación y desarrollo de productos, (x) Control de calidad de los productos y procesos y (xi) planificación y programación de la producción. Y de igual forma una serie de factores de producción asociados (i) con los materiales cuando no cumplen especificaciones de tiempo, cantidad y calidad, (ii) con la mano de obra cuando se presentan cambios de ritmo de trabajo, ausentismo y accidentes, (iii) con las maquinas cuando fallan, y se presentan ausencias de repuestos y herramientas. Estas variables de cantidad y variedad de los procesos, productos y servicios hacen que los sistemas sean inestables y complejos.

Consecuente a esto, teniendo en cuenta la inestabilidad de los sistemas de manufactura, debido a los recursos que intervienen y a la incertidumbre de variables externas. De acuerdo con [3], esto se debe a cuatros aspectos importantes como: (i) Interdependencia, dentro de un sistema de manufactura las estaciones de trabajo dependen unas de otras, independientemente si el tipo de proceso es Flow shop, Job shop o por Project, (ii) La relación entre los eventos que se presenta y los cambios de estados que se generan, (iii) Incertidumbre, esto debido a la variables externas dinámicas, incontrolables e impredecible y (iv) la irreversibilidad la cual está ligada con el grado de incertidumbre y los costos que se generan.

En los estudios y análisis de la complejidad en la revisión de la literatura la incertidumbre aparece claramente en el concepto de complejidad, donde [4] establecen que la incertidumbre es todo aquello que no se sabe con precisión su comportamiento, y la definen como la desviación que tiene el sistema con respecto a lo planificado. De acuerdo con [5], la planificación en los sistemas de manufactura ayuda a las compañías a determinar de mejor manera el uso de sus recursos para lograr sus objetivos. Según [6], la complejidad matemáticamente se puede medir cuando se relaciona lo real menos lo pronosticado. Por consiguiente desde el marco de la complejidad una ventana de investigación seria ayudar planificadores de manufactura a administrar cuales son los niveles adecuados de complejidad que un sistema puede tener, debido a que es un aspecto que siempre va existir en todo tipo de escenario.

El entorno industrial de diferentes países se encuentra clasificado entre grande, mediana y pequeña industria. Esta depende de varios parámetros que se utilizan para establecer las diferencias, como las ventas brutas, el número de empleados, los activos totales, las tasas de impuestos u otros mecanismos o fórmulas económicas que intentan facilitar la clasificación [7]. En Latinoamérica existe una gran proporción de empresas en el sector Industrial pertenecientes a la Pequeña y Mediana Empresa (Pyme), donde los gerentes se deben enfrentar a grandes desafíos, dado que no solamente se debe tener habilidad, agilidad y calidad sino también ser competitivo y estratégico en los negocios [8][9]. Por tradición, estas Pymes han servido de apoyo a las grandes empresas, de acuerdo con [10] esto se ve reflejado gracias a la alta variedad de productos y servicios que ofrecen. Por lo anterior, se genera un interés investigativo por buscar medidas que brinden un fortalecimiento productivo y competitivo, focalizados en la reducción de costos, mejora de la calidad, tiempos de entrega, flexibilidad, velocidad de respuesta y personalización.

Consecuente a esto, [11] establece que un aumento en la flexibilidad en los procesos de fabricación y variedad en los productos ocasionan una mayor complejidad en el sistema. Entendiéndose por sistema complejo aquel que está compuesto por un gran número de partes que interactúan de manera no simple [12]. De acuerdo con [13] también hay que tener en cuenta el número de piezas, los tipos de procesos, el tipo de operación y la estabilidad de la programación de la producción. Según [14] existen factores determinantes en la complejidad de la fabricación como: (i) la estructura del producto; (ii) la estructura de la planta; (iii) las funciones de planificación y programación; (iv) el flujo de información durante el proceso; (v) el dinamismo, la variabilidad y la incertidumbre del entorno, y (vi) otras funciones dentro de la organización como capacitación e información. De acuerdo con [15] el nivel de complejidad depende de las características de cómo se encuentra estructurado el sistema, estando conformado por la cantidad y la variedad que participan y relacionan entre ellos. A menudo los estudios sobre la complejidad están siendo cada vez más frecuentes y fundamentales para las organizaciones modernas [16-20] debido a que quienes las administran tratan de gestionarla, reducirla o eliminarla en sus procesos, por lo que reducen costos, aumentan ingresos y mejoran la competitividad en los mercados internos y externos. En un sistema de manufactura la complejidad siempre tiene presencia, desde que entran las materias primas hasta que sale el producto terminado. En la medida que las empresas tengan que ampliar su capacidad por la volatilidad de la demanda, las operaciones de igual forma tienen a ser cada vez más complejas.

La ausencia de gestión de la complejidad en los sistemas de manufactura, trae consigo consecuencias o efecto como desajustes en los planes y las reprogramaciones, lo que aumentan los costos reflejados en el consumo de horas de alistamiento de las máquinas, tiempos de reparación, horas extras, entre otras. Adicional los sistemas de manufactura deben vigilar el entorno en el que predominan, dado que cualquier cambio social, político, legal, cultural, demográfico, económico, tecnológico, ambiental, con los proveedores, intermediarios, clientes y consumidores, traerá consigo ambientes de incertidumbre y complejidad dentro del sistema. Los efectos de la globalización y el crecimiento acelerado de las economías provocan quiebres, por lo que las empresas deben prepararse para poder sobrevivir.

Ante la necesidad que se les presenta a las compañías principalmente la pequeña y mediana industria (Pymes) de ofrecer óptimos niveles de servicio, se hace necesario la implementación de eficientes sistemas de manufactura, de manera que se minimicen los costos de producción, se entregue la mayor cantidad de órdenes a los clientes y se aumenten los ingresos [21]. En la investigación desarrollada por [22] establecen que la complejidad impacta negativamente en los indicadores de la empresa y genera pérdidas relacionadas con las utilidades, ingresos, volumen de ventas y pérdidas de clientes. De igual forma, [23] establecen que el impacto se ve reflejado sobre la productividad y la calidad de los procesos. Por otro lado, [24] en su investigación evidencian que los costos relacionados con los inventarios se encuentran ligados con la complejidad de manufactura. Así mismo, la incertidumbre del mercado el cual incrementa la complejidad en los sistemas productivos [25].

En esta tesis doctoral se identifican aspectos relevantes y se desarrollan procesos de medición y gestión de la complejidad, tomando como referente el sector manufacturero de pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena – Colombia. Para esto se identifican los efectos y factores que generan complejidad. De igual forma se identifica estrategias, métodos y herramientas de gestión. También se estudia la relación existente entre las características y los elementos de un sistema manufactura con respecto a la complejidad en los diferentes sectores económicos. Consecuentemente, se diseña un modelo conceptual y se propone una nueva métrica entrópica e híbrida. Debido a varios aspectos (i) La identificación de algunas características, inconvenientes o deficiencias en las métricas clásicas y extendidas. (ii) Tendencia baja hacia mediciones de la complejidad dinámica. (iii) Mayor inclinación hacia métodos objetivos, analíticos y modelos matemáticos, fundamentados en técnicas de optimización, algoritmos y simulación de procesos y (iv) De los métodos entrópico el menos abordado es Entropía de Shannon siendo el de mayor aplicabilidad en entornos generales o sistemáticos. Así mismo, se presentan dos aplicaciones del modelo en sistemas Flow Shop (FS) - Make to Stock (MTS) y Job Shop (JS) - Make to Order (MTO). Ambos casos permitieron una validación práctica del modelo e identificaron focos habilitadores para procesos de mejora, que permitan reducir o eliminar la alta complejidad tanto en estaciones de trabajo, referencias de productos, procesos de fabricación y gestión de variables aleatorias.

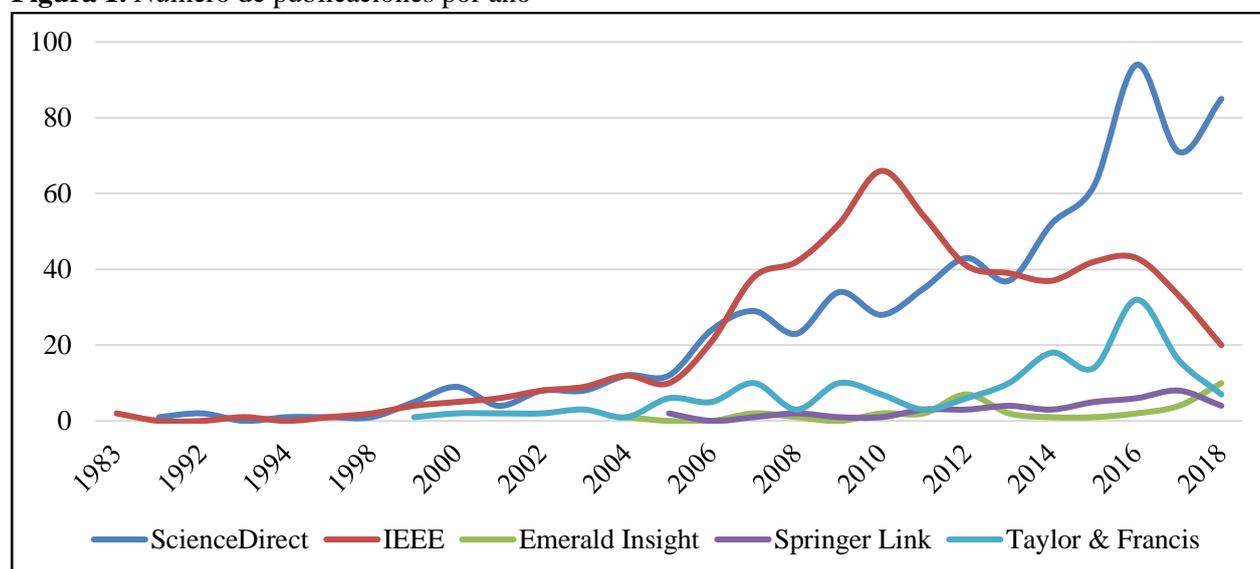
1.1 Justificación e interés de la temática

Desde inicio de la década de los años 80 hasta la actualidad, al realizar una búsqueda sobre el término: "Complejidad, en el sistema de fabricación y en la cadena de suministro" se puede evidenciar que empiezan aparecer las primeras investigaciones a partir del año 1983 y que ha estado en aumento en el transcurrir de los años. La tendencia ha sido positiva en cuanto al número de publicaciones relacionadas con la temática en las distintas bases de datos científicas como Springer, Emerald, Taylor and Francis, destacando un comportamiento notorio en Science Direct y IEEE Xplore (ver figura 1).

La estrategia de búsqueda se construyó en cuatro etapas, (i) Búsqueda general en base de datos, en esta etapa se buscan en las bases de datos mencionadas todas las investigaciones relacionadas con

la complejidad en sistemas de manufactura y cadena de suministro, esta revisión bibliográfica se llevó a cabo mediante la indagación de información en Emerald, IEEE Xplore, Science Direct, Springer and Taylor and Francis a partir de la ruta de <Titulo > “Complexity and Manufacturing System” y <Titulo> “Complexity and Supply Chain”. (ii) Búsqueda con filtro según las palabras claves, en esta etapa se realiza una búsqueda más detallada teniendo en cuenta la complejidad, manufactura y cadena de suministro, de igual forma en las bases de datos anteriormente mencionadas, mediante la ruta <Titulo-Abstract-Keywords> “Complexity and Manufacturing System” y <Titulo-Abstract-Keywords> “Complexity and Supply Chain”. Este proceso permitió depurar la investigación del eje temático, lo que proporciono acotar el campo de estudio pasando de un total general de 308.407 trabajos investigativos a 1451 en forma filtrada. Los resultados permitieron hacer un análisis estadístico de características como el año de publicación, tipos de publicaciones, revistas, autores y palabras más relevantes.

Figura 1. Número de publicaciones por año



Al estudiar la búsqueda por palabras claves, de un total de 1451 documentos, 766 documentos representados en un 52,8% corresponden a artículos de investigación, 442 documentos que equivalen a un 30,4% hacen referencia a publicaciones mediante conferencias, 134 documentos representados en un 9,2% corresponden a libros de investigación, y un 7,6% capítulos de libros, simposios y otro tipo de publicaciones. Para el caso de análisis es posible identificar que la temática presenta una alta información en los tipos de publicación como artículos de investigación.

Estudios de [26] estiman que la importancia de la temática no sólo recae en consideraciones académicas, y hacen alusión a que existen beneficios de tipo económicas financieras, afirmando que el 25% de los costos totales de las compañías manufactureras se deben a la complejidad relacionada con el producto y el proceso. Desde otra perspectiva tecnológica, [27] establecen que el uso de herramientas y tecnologías, sirven de apoyo para la gestión y toman relevancia al momento de tener que evitar, reducir o controlar la complejidad en los sistemas.

1.2 Cuestiones de la investigación

En general las principales cuestiones de la investigación se fundamentan en tres (3) directrices focalizadas en la identificación, medición y gestión de la complejidad en sistemas de manufactura. A continuación se hace mención:

- Cuestión 1 (C1): ¿Cuáles son los efectos y factores que generan complejidad en el sector manufacturero de pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena - Colombia?
- Cuestión 2 (C2): ¿Cómo medir la complejidad en los sistemas manufactura de pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena - Colombia?
- Cuestión 3 (C3): ¿Cómo se puede gestionar la complejidad en los sistemas de manufactura de pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena – Colombia?

1.3 Objetivos de la investigación

La presente tesis doctoral tiene por objeto general (OG):

- Diseñar un modelo para la medición y gestión de la complejidad en sistemas de manufactura de los distintos subsectores económicos, que facilite el proceso de gerenciamiento y asertividad en la toma de decisiones.

En este trabajo se busca poder determinar la manera adecuada para medir y gestionar la complejidad por subsectores económicos de manufactura, de tal manera que las empresas puedan comparar y tomar decisiones en función de su complejidad. De acuerdo con [28] la complejidad ha empezado a considerarse como una nueva forma de evaluación de las empresas industriales, siendo además una de las herramientas útiles para el análisis de mejoras y la reestructuración empresarial.

Para el avance de este objetivo general se tuvieron en cuenta los siguientes objetivos específicos (OE):

- (OE1)- Recolectar información a través de una revisión de la literatura, sobre las tendencias investigativas, campos científicos de aplicación, clasificación y métodos de medición de la complejidad en sistemas de manufactura.
- (OE2)- Identificar por medio de un estudio los efectos y factores que generan complejidad en el proceso de manufactura de diferentes subsectores económicos, que permitan la identificación de técnicas, métodos e indicadores para una propuesta de solución.
- (OE3)- Estudiar la relación existente entre las características y elementos de un sistema manufactura con respecto a la complejidad, de diferentes sectores económicos, que permitan la determinación del nivel de significancia entre subsectores, tipo de operación y tipo de proceso y a su vez un mayor entendimiento respecto a indicadores de desempeño.
- (OE4)- Diseñar un modelo conceptual y métrica para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura, que sirva de apoyo a la aplicación de modelos matemáticos y a los tomadores de decisiones para un mayor entendimiento procedimental.

- **(OE5)**- Validar el impacto del modelo y nueva métrica propuesta, que permita una evaluación y entendimiento actual del sistema, en casos de estudios del sector de manufactura de pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena – Colombia.

1.4 Hipótesis para la investigación

La ejecución de estos objetivos determina el planteamiento de las siguientes hipótesis (H):

- **(H1)**- Los subsectores económicos, tienen un efecto en la complejidad de los sistemas de manufactura
- **(H2)**- Los tipos de operaciones, tienen un efecto en la complejidad de los sistemas de manufactura
- **(H3)**- Los tipos de procesos, tienen un efecto en la complejidad de los sistemas de manufactura
- **(H4)**- Las variables identificadas en los elementos de los sistemas de manufactura tienen una influencia positiva o negativa entre ellas
- **(H5)**- Las características de manufactura, se asocian con la complejidad de los elementos de un sistema.
- **(H6)**- Los factores diseño estructural, tiempo de producción por etapa, frecuencia de tiempo de llegadas de materias primas y cantidad de llegadas de materias primas, tiene un efecto sobre la complejidad de los sistemas de manufactura.
- **(H7)**- La complejidad en los sistemas de manufactura influyen en las medidas de desempeño de tiempo de ciclo, eficiencia, productos terminados, productividad, Velocidad de producción (Throughput), productos en procesos y costos de producción.
- **(H8)**- El diseño de un modelo conceptual para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura, sirve de apoyo y garantiza un mayor entendimiento y comprensión.
- **(H9)**- Los resultados obtenidos por medio del método cualitativo y subjetivo en torno a la complejidad del sistema, están alineados con los resultados finales del método cuantitativo objetivo.

1.5 Principal aporte de la tesis

Aunque se ha estudiado la complejidad, no hay un enfoque común y muchos modelos son teóricos [29]. De acuerdo con Peter Drucker, los sistemas de manufacturas deben ser medibles y cuantificables, dado que lo que se mide se puede controlar, sin embargo hay que tener en cuenta que medir la complejidad no es cosa sencilla [20].

La tesis doctoral enmarca un aporte importante desde un ámbito científico y académico, ya que ayuda resolver interrogantes relevantes a la temática, adicional a esto reducir la brecha entre la teoría y la práctica mediante la medición de escenarios de tipo manufacturero. Desde un ámbito económico – social, brinda un aporte al gremio del sector manufacturero principalmente a las pequeñas y medianas empresas, de poder tener un soporte operacional en beneficio de sus indicadores de desempeño.

Otro tipo de aportaciones, se pueden evidenciar desde un ámbito práctico, dado que la tesis proporciona al estado del conocimiento el desarrollo de modelos conceptuales y matemáticos que ayudan a la toma de decisiones en la gestión de las operaciones de un sistema de manufactura. En particular:

- Se diseña un modelo conceptual para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura, el cual sirve de apoyo para poder llevar a cabo de manera sistemática la aplicación de modelos matemáticos.
- Se desarrolla una nueva métrica de modelamiento y se hace un análisis estadístico centrado en la medición de la complejidad en sistemas de manufactura, el cual va permitir que los tomadores de decisiones logren un mayor entendimiento del sistema estudiado.
- Se valida el impacto del modelo por medio de métodos cuantitativos, los cuales logran un mayor rendimiento en los casos estudiados en pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena – Colombia.

A partir de la investigación desarrollada en esta tesis se han producido las siguientes publicaciones **(PR)** en revistas y libros de alto impacto:

- **(PR1):** Herrera Vidal G. & Coronado Hernández, J.R. Complexity in manufacturing systems: a literature review. *Prod. Eng. Res. Devel.* 15, 321–333 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11740-020-01013-3>
Contribución: Germán Herrera Vidal fue el autor correspondiente y presentó el artículo, lo escribió junto con Director Jairo R. Coronado Hernández.
- **(PR2):** Herrera Vidal, G. & Coronado Hernández, J.R. Study of the effects of complexity on the manufacturing sector. *Prod. Eng. Res. Devel.* 15, 69–78 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11740-020-01014-2>
Contribución: Germán Herrera Vidal fue el autor correspondiente y presentó el artículo, lo escribió junto con Director Jairo R. Coronado Hernández.
- **(PR3):** Herrera Vidal, G., Coronado Hernández, J.R. Minnaard, C., Gatica, G., & Schwarzenberg, P. (2022). Statistical analysis of manufacturing system complexity. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08981-z>
Contribución: Germán Herrera Vidal fue el autor correspondiente y presentó el artículo, lo escribió junto con Director Jairo R. Coronado Hernández y Codirectora Claudia Minnaard, con apoyo de los Doctores Gustavo Gatica y Pablo Schwarzenberg.
- **(PR4):** Herrera Vidal, G., Coronado Hernández, J.R. & Minnaard, C. (2022). "Measuring Manufacturing System Complexity: A Literature Review", which you submitted to *Journal of Intelligent Manufacturing*. (En proceso de publicación).

Contribución: Germán Herrera Vidal fue el autor correspondiente y presentó el artículo, lo escribió junto con Director Jairo R. Coronado Hernández y Codirectora Claudia Minnaard.

- **(PR5):** Herrera Vidal, G., Coronado Hernández, J.R. & Minnaard, C. (2022). Modeling and statistical analysis of complexity in manufacturing systems under flow shop and hybrid environments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(9), 3049-3058.

<https://doi.org/10.1007/s00170-021-08028-9>

Contribución: Germán Herrera Vidal fue el autor correspondiente y presentó el artículo, lo escribió junto con Director Jairo R. Coronado Hernández y Codirectora Claudia Minnaard.

- **(PR6):** Herrera Vidal, G., Coronado Hernández, J.R. & Niebles, A. C. P. (2022). Conceptual Model for Measuring Complexity in Manufacturing Systems. In *Proceedings of Third International Conference on Sustainable Computing* (pp. 181-189). Springer, Singapore.

https://doi.org/10.1007/978-981-16-4538-9_19

Contribución: Germán Herrera Vidal fue el autor correspondiente y presentó el artículo, lo escribió junto con Director Jairo R. Coronado Hernández y la profesional Andrea Niebles.

- **(PR7):** Herrera Vidal, G., Coronado Hernández, J.R. & González, G. (2022). Evaluation and Analysis of Models for the Measurement of Complexity in Manufacturing Systems. In *Proceedings of Third International Conference on Sustainable Computing* (pp. 469-477). Springer, Singapore.

https://doi.org/10.1007/978-981-16-4538-9_46

Contribución: Germán Herrera Vidal fue el autor correspondiente y presentó el artículo, lo escribió junto con Director Jairo R. Coronado Hernández y el doctor Gustavo Gatica.

(PR8): Herrera Vidal, G., Coronado Hernández, J.R. & Minnaard, C. (2023). A New Perspective on Measuring Entropic Complexity in Manufacturing Systems. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. Contribución: Germán Herrera Vidal fue el autor correspondiente y presentó el artículo, lo escribió junto con Director Jairo R. Coronado Hernández y Codirectora Claudia Minnaard.

(PR9): Herrera Vidal, G., Coronado Hernández, J.R. & Minnaard, C. (2023). Measuring Complexity in Manufacturing Systems: A New Metric in Flow Shop (Fs) and Job Shop (Js) Environments. *Journal Operations Management Research*. (Bajo revisión).

Contribución: Germán Herrera Vidal fue el autor correspondiente y presentó el artículo, lo escribió junto con Director Jairo R. Coronado Hernández y Codirectora Claudia Minnaard.

(PR10): Herrera Vidal, G., Coronado Hernández, J.R. & Minnaard, C. (2023). Improving Static Complexity in Manufacturing Systems: Under the Economic Lot Sizing Problem

(ELSP) and Single Minute Exchange Die (SMED) Approach. Journal Operations Management Research. (Bajo revisión).

Contribución: Germán Herrera Vidal fue el autor correspondiente y presentó el artículo, lo escribió junto con Director Jairo R. Coronado Hernández y Codirectora Claudia Minnaard.

- **(PR11):** Ramos Darwin & Herrera Vidal, G., (2022). Modelación Matemática para la Planificación Agregada de la Producción-Distribución Ligada a la Complejidad Estática bajo un Enfoque Determinístico y Estocástico. Tesis de Maestría. (Culminada), Artículo de investigación (En desarrollo). Contribución: Darwin Ramos fue el autor y presentó su tesis, la escribió junto con Director Germán Herrera Vidal.
- **(PR12):** Ubaldo Calle & Herrera Vidal, G., (2022). Modelo Multiobjetivo para la Planificación de las Operaciones con Consideraciones de Fuentes de Complejidad Estática y Dinámica. Caso de Aplicación Empresa Camaronera. Tesis de Maestría. (Culminada) Artículo de investigación (En desarrollo). Contribución: Ubaldo Calle fue el autor y presentó su tesis, la escribió junto con Director Germán Herrera Vidal.

1.6 Organización de la tesis

La tesis doctoral se encuentra organizada por diez (10) capítulos. A continuación, se describen brevemente y de manera general los temas abordados en cada uno, sin incluir el capítulo 1 correspondiente a la introducción general.

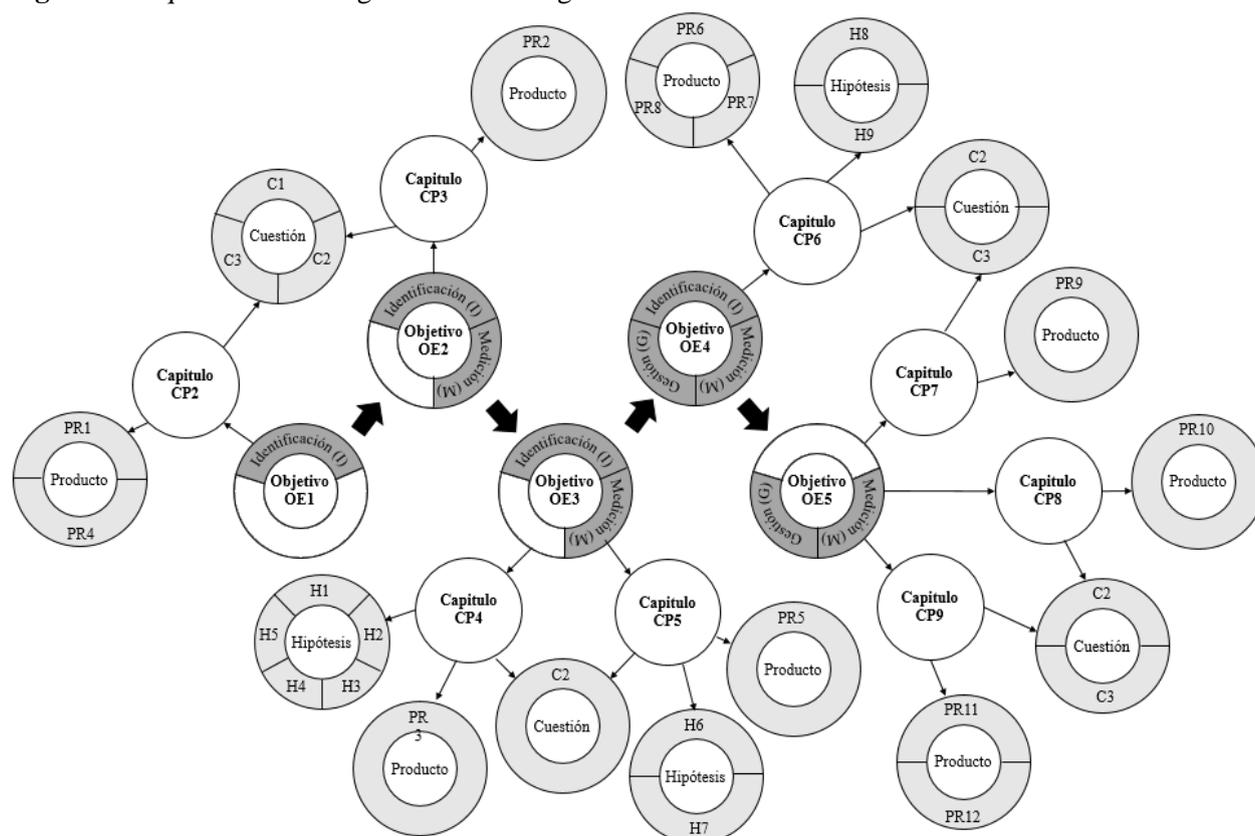
- **Capítulo 2 (CP2): Revisión de la Literatura.** En este capítulo, se realiza una revisión de la literatura, sobre las tendencias investigativas, campos científicos de aplicación, clasificación y métodos de medición de la complejidad en sistemas de manufactura.
- **Capítulo 3 (CP3): Efecto y Factores de Complejidad en Sistemas de Manufactura.** Este capítulo identifica los efectos y factores que generan complejidad en el proceso de manufactura de diferentes subsectores económicos. De igual forma las estrategias, métodos y herramientas de gestión.
- **Capítulo 4 (CP4): Análisis Estadístico de la Complejidad en Sistemas de Manufactura.** En este capítulo se estudia la relación existente entre las características y los elementos de un sistema manufactura con respecto a la complejidad en los diferentes sectores económicos.
- **Capítulo 5 (CP5): Modelamiento y análisis de la complejidad en sistemas de manufactura.** En el presente capítulo se desarrolla el modelamiento estructural teniendo en cuenta una configuración tipo flow shop e híbrida. A cabo se desarrolla un análisis estadístico respecto a los indicadores de desempeño, estadístico experimental y factorial.

- **Capítulo 6 (CP6): Modelo conceptual y métrica para la medición de la complejidad en sistema de manufactura.** En este capítulo se diseña un modelo conceptual y se propone una nueva métrica entrópica e híbrida para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura.
- **Capítulo 7 (CP7): Aplicación del modelo en sistema Flow Shop (FS) y Make to Stock (MTS).** En este capítulo se valida el impacto del modelo y nueva métrica propuesta, a partir de la participación de una empresa caso de estudio del sector de manufactura de pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena – Colombia. Específicamente al subsector en fabricación de materiales plásticos y resinas
- **Capítulo 8 (CP8): Aplicación del modelo en sistema Job Shop (JS) y Make to Order (MTO).** En este capítulo se valida el impacto del modelo y nueva métrica propuesta, a partir de la participación de una empresa caso de estudio del sector de manufactura de pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena – Colombia. Específicamente al subsector metalmecánico en la fabricación de productos elaborados de metal, excepto maquinaria y equipo.
- **Capítulo 9 (CP9): Gestión de la complejidad en sistemas de manufactura.** En este capítulo se pone en práctica desde situaciones reales la gestión de la complejidad en sistemas de manufactura, específicamente en casos de aplicación de empresas del sector industrial en la ciudad de Cartagena – Colombia. El abordaje se hace desde dos (2) proyectos de investigación alineadas a tesis de maestría, donde el autor principal de esta tesis doctoral figura como director principal.
- **Capítulo 10 (CP0): Conclusiones Generales.** En este capítulo se sintetizan los aspectos más relevantes de esta investigación, las principales aportaciones y los futuros trabajos.

1.7 Metodología de la investigación

La metodología de investigación para el desarrollo de esta tesis doctoral, tiene en cuenta tres vectores claves como son la identificación (**I**), medición (**M**) y la gestión (**G**) de la complejidad en sistemas de manufactura. Partiendo desde la exploración de las bases teóricas encontradas en la revisión de la literatura, que sirven de insumo para la contextualización del problema objeto de estudio, estableciendo las cuestiones investigativas (**C**), la formulación de un objetivo general (**OG**) y varios específicos (**OE**), el planteamiento de hipótesis (**H**) y los aportes representados en productos de investigación (**PR**). Cabe resaltar que la tesis se estructura en diez (10) capítulos (**CP**) claramente identificados. A continuación la figura 2 esquematiza la metodología abordada.

Figura 2. Esquema metodológico de la investigación



La investigación realizada se obtiene de fuentes primarias, fundamentadas en base de datos científicas como: IEEE Xplore, Science Direct, Emerald, Springer, Taylor y Francis, para esto se hizo una construcción de una metodología (Ver capítulo 2) que comprende tres fases (i) Problemática y preguntas orientadoras, como:

- P1: ¿Qué es la complejidad como sistema?
- P2: ¿Cuáles son los campos científicos de interés de la complejidad?
- P3: ¿Cómo es la complejidad en los sistemas de manufactura?
- P4: ¿Cuáles son los tipos de complejidad en los sistemas de manufactura?
- P5: ¿Cuáles son las fuentes de complejidad en los sistemas de manufactura?
- P6: ¿Cómo es la evolución del número de publicaciones por año?
- P7: ¿Cuáles son los tipos de publicaciones más destacadas?
- P8: ¿Cuáles son las revistas más relevantes?
- P9: ¿Cuáles son los autores con más publicaciones, citas y asociaciones?
- P10: ¿Cuáles son las palabras que más se relacionan en la temática?

(ii) Estrategia de búsqueda de la información, usando herramientas de filtro de información que proporcionan las mismas bases de datos y (iii) Análisis estadístico de la información por medio de un análisis cuantitativo y bibliométrico, soportados con herramientas informáticas como hoja de cálculo y software VosViewer. De igual forma se estableció una metodología para el estudio de efectos y factores de complejidad (Ver capítulo 3) y otra para el análisis estadístico de la complejidad (Ver capítulo 4).

Capítulo 2

Revisión de la Literatura

2.1 Objetivo

(OE1)- Recolectar información a través de una revisión de la literatura, sobre las tendencias investigativas, campos científicos de aplicación, clasificación y métodos de medición de la complejidad en sistemas de manufactura.

2.2 Definición de Complejidad

Haciendo una revisión de la literatura, una de las primeras definiciones sobre complejidad aparece en los trabajos desarrollados por [30] con la llamada ley de variedad de requisitos, donde establece que solo complejidad absorbe complejidad. Esta ley sugiere que a mayor complejidad, mayor control el sistema, es decir, el esfuerzo de la complejidad del observador debe ser superior frente a ese dominio de acción. Consecuente a esto una de las primeras definiciones sobre complejidad fue aportada por [31] quien define complejidad estipulando que un sistema es complejo cuando posee una alta variedad de elementos, que al relacionarse unas con otras, no se hace tan sencillamente. Denotándose como un sistema sencillo aquel que tiene limitaciones en los parámetros, a diferencia del sistema complejo que es más heterogéneo [32]. Contemporáneamente sobresalieron los estudios sobre la teoría de la complejidad proveniente de las investigaciones sobre el fenómeno termodinámico a sistemas alejados del equilibrio desarrollados por Prigogine Ilya, físico químico Ruso, quien fue galardonado por la Real Academia Sueca de Ciencias con el premio Nobel de Química en el año de 1977. De estos estudios sobresalen los asociados con los sistemas complejos. Para [33] un sistema es complejo cuando interactúan distintos elementos como: (i) Interacciones significativas, el cual hace alusión a la dependencia entre los elementos que conforman el sistema. (ii) El tamaño del sistema, que está asociado a la cantidad de dependencias que la conforman. (iii) Al comportamiento no determinístico de los sistemas. (iv) Asimetría, que dificulta su entendimiento. (v) Restricciones no holónicas, que implica una restricción para el control y predicción del sistema.

Uno de los autores que sobresale es [34] quien establece que "la complejidad del sistema debe ser proporcional a la cantidad de información requerida para describir el sistema". En su investigación determinó que un sistema se hace complejo cuando existe una gran cantidad de entidades que entran y salen del sistema, y cuando existe un alto número de locaciones donde estas deben interrelacionarse. A medida que aumenta la comunidad, la variedad disminuye y la complejidad disminuye. En este sentido [35], proponen que la complejidad se entiende como una calidad del sistema donde el grado está sujeto de la cantidad de elementos que existan en el sistema, las relaciones que se desarrollen entre ellos y las diferentes condiciones en que se encuentre. Consecuente a esto, [36][37] proponen que la complejidad de un sistema depende de la heterogeneidad, diversidad y pluralidad de los distintos elementos que conformen el sistema. En un

contexto más amplio, La complejidad también depende de su variabilidad temporal, debido a efectos específicos de la industria y de las empresas, la cual conducen principalmente a la ineficiencia y al aumento de los costos [38]. Los autores [28], afirman que la complejidad ha empezado a considerarse como una nueva forma de evaluación de las empresas industriales, siendo además una de las herramientas útiles para el análisis de mejoras y la reestructuración empresarial. Desde un escenario manufacturero empiezan aparecer distintos tipos de conceptos asociados con el producto o con los factores de producción., de acuerdo con [39] la complejidad depende de la variedad un producto o de factores dentro de la producción, dependiendo de la cantidad de partes involucradas o tipos de procesos y su variabilidad a lo largo del tiempo.

En los últimos años, los científicos se han preocupado por estudios de este tipo de temática, tal como se evidenció en los análisis cuantitativos y bibliométricos, donde el interés por las redes complejas se hace notorios, donde se establecen que los sistemas complejos están compuestos por una serie de componentes que interactúan en el desarrollo de la manufactura [40-42]. Pero las empresas no están aisladas participan de estructuras y aparece también el concepto la complejidad en las redes empresariales, donde emergen comportamientos no esperados cuando nodos de una red participan en otras redes. Estos comportamientos traen consigo una relación entre la gran cantidad de nodos e información que fluye entre ellos, haciendo que los sistemas sean cada vez más complejos. De acuerdo con [43], La complejidad en las redes está aumentando cada vez más porque se tienen que afrontar una serie de estrategias anidadas con el entorno, dado lo anterior entre mayor sea el número de agentes que participan e interactúan, mayor es la complejidad de la red [44].

2.3 Campos científicos de interés de la complejidad

La complejidad ha tenido diversos rumbos o caminos debido a las diferentes disciplinas que existen dentro de un entorno empresarial, entre estas se encuentran (i) Ciencias de la administración, (ii) Administración de operaciones, (iii) Manufactura, (iv) Ciencias organizacionales y (v) Gestión de la cadena de suministro. En la tabla 1 se presenta una revisión de documentos encontrados en los diferentes campos de interés de la complejidad, es notorio un gran número de investigaciones en disciplinas como Ciencias de la administración, Ciencias organizacionales y Administración de operaciones y en una menor escala los campos científicos como Manufactura y Gestión de la cadena de suministros. Es evidente que estudios de complejidad en países latinoamericanos como Colombia, Argentina, Chile, Ecuador y entre otros, asociada a entornos empresariales presentan un alto grado de escasez, por tanto, es un aspecto débil en los sistemas de manufactura y cadenas de suministros de se desea gestionar, reducir o eliminar factores que inciden en la complejidad.

2.4 Complejidad en sistemas de manufactura

La manufactura es el proceso de agregar valor a un material para construir un producto [93]. El arte de la fabricación implica un proceso, o una secuencia repetitiva de operaciones, utilizada para construir el producto. La fabricación requiere recursos para producir el producto, incluida una infraestructura de personas en una organización que proporciona el soporte necesario para la fabricación. [94] en su investigación establece para llevar a cabo un proceso de ingeniería fabril hay que tener en cuenta unas actividades como: (i) La escogencia del proceso, (ii) Definición del

método de trabajo y precedencias de las actividades, (iii) elección de las máquinas, (iv) Elección de los equipos y herramientas, (v) Diseño de las instalaciones, (vi) Especificación de los tiempos tipos de cada estación de trabajo, (vii) Determinación del tipo de operaciones, (viii) Control de costos de manufactura, (ix) Investigación y desarrollo de productos, (x) Control de calidad de los productos y procesos y (xi) planificación y programación de la producción.

Tabla 1. Revisión de estudios de la complejidad en diferentes disciplinas

Campos Científicos	Autores
Ciencias de la administración	Remus (1987) [45]; Rivkin (2000) [46]; Pich et al. (2002) [47]; Mihm et al. (2003) [48]; Sommer and Loch (2004) [49]; Linn and Tay (2007) [50]; Rahmandad (2008) [51]; Mihm et al. (2010) [52]; Kalkanci et al. (2011) [53]; Briscoe and Rogan (2016) [54].
Ciencias Organizacionales	Gresov et al. (1993) [55]; Thiétart and Forgues (1995) [56]; Anderson (1999) [57]; Lewin (1999) [58]; Cohen (1999) [59]; Anderson et al. (1999) [60]; Morel and Ramanujam (1999) [61]; Boisot and Child (1999) [6]; McKelvey (1999) [62]; Dooley and Van de Ven (1999) [63]; Siggelkow and Rivkin (2005) [64]; Ethiraj and Levinthal (2009) [65].
Manufactura	Calinescu et al. (1998) [66]; Deshmukh et al. (1998) [4]; Efstathiou (2002) [67]; Huatuco et al. (2009) [68]; Efthymiou et al. (2012) [69]; ElMaraghy et al. (2012) [70].
Administración de Operaciones	Ulrich et al. (1989) [71]; Chen and Bulfin (1993) [72]; Cooper et al. (1995) [73]; Rayward (1995) [74]; De Reyck and Herroelen (1996) [75]; Soukhal et al. (2005) [76]; Sivadasan et al. (2006) [25]; Yuan et al. (2007) [77]; Briskorn et al. (2010) [78]; Gawiejnowicz and Kononov (2010) [79]; Brucker et al. (2011) [80]; Espinosa and Walker (2013) [81]; Pinker et al. (2014) [82]; Archetti et al. (2015) [83]; Bruns et al. (2016) [84]; Kuschel and Bock (2016) [85].
Gestión de la Cadena de Suministros	Wilding (1998) [86]; Novak and Eppinger (2001) [87]; Milgate (2001) [88]; Vachon and Klassen (2002) [89]; Perona and Miragliotta (2004) [16]; Bozarth et al. (2009) [22]; Yang and Yang (2010) [90]; Gimenez et al., (2012) [91]; Blome et al. (2014) [92]; Coronado (2016) [20].

El estudio de la complejidad nace de tratar de explicar y predecir el comportamiento de un sistema a través de modelos formales. Los modelos describen un conjunto de variables de entrada que se transforman en una variable o conjunto de variables de salida, a través de un conjunto de procesos internos con el objeto de predecir el comportamiento de un sistema. Para [95] un sistema es una conglomeración de elementos como planta, proceso, producto y partes que interactúan y se relacionan entre sí, en este sentido, se puede considerar a los sistemas como una representación de una realidad. De igual forma un sistema complejo es una mezcla de aspectos relacionados con el material, las maquinarias, las personas, el proceso, las instalaciones y los flujos relacionados con la información, materiales y documentos. Todo sistema de manufactura está compuesto por entidades de entrada como materias primas, información, energía y por entidades de salida asociado con los productos terminados, desechos e información [96]. Los sistemas de manufactura se caracterizan por ser inestables, debido a los recursos que intervienen y por la incertidumbre de variables externas. De acuerdo con [3], esto se debe a cuatro aspectos importantes como: (i)

Interdependencia, dentro de un sistema de manufactura las estaciones de trabajo dependen unas de otras, independientemente si el tipo de proceso es Flow shop, Job shop o por Project, (ii) La relación entre los eventos que se presenta y los cambios de estados que se generan, (iii) Incertidumbre, esto debido a la variables externas dinámicas, incontrolables e impredecible y (iv) la irreversibilidad la cual está ligada con el grado de incertidumbre y los costos que se generan.

En síntesis en un sistema de manufactura intervienen factores de producción asociados con: (i) los materiales cuando no cumplen especificaciones de tiempo, cantidad y calidad, (ii) con la mano de obra cuando se presentan cambios de ritmo de trabajo, ausentismo y accidentes, (ii) con las maquinas cuando fallan, ausencia de repuestos y herramientas. Donde las variables de cantidad y variedad de los procesos, productos y servicios hacen que los sistemas sean inestables y complejos. Como consecuencia aparecen los desajustes en los planes y las reprogramaciones, lo que aumentan los costos relegados en el consumo de horas de alistamiento de las máquinas, tiempos de reparación, horas extras, entre otras. Comprender la existencia de estas características permite considerar que las empresas manufactureras son sistemas complejos en entornos complejos y que la administración o gestión se vuelve compleja. Adicional los sistemas de manufactura deben vigilar el entorno en el que predominan, dado que cualquier cambio social, político, legal, cultural, demográfico, económico, tecnológico, ambiental, con los proveedores, intermediarios, clientes y consumidores, traerá consigo ambientes de incertidumbre y complejidad dentro del sistema. Los efectos de la globalización y el crecimiento acelerado de las economías provocan quiebres, por lo que las empresas deben prepararse para poder sobrevivir. En conclusión el entorno empresarial es cada vez más complejo y competitivo donde las organizaciones deben responder a diferentes condiciones de mercado reconfigurando sus procesos, productos y servicios. En los estudios y análisis de la complejidad en la revisión de la literatura la incertidumbre aparece claramente en el concepto de complejidad, donde [4] establecen que la incertidumbre es todo aquello que no se sabe con precisión su comportamiento, y la definen como la desviación que tiene el sistema con respecto a lo planificado. De acuerdo con [5], la planificación en los sistemas de manufactura ayuda a las compañías a determinar de mejor manera el uso de sus recursos para lograr sus objetivos. Según [6], la complejidad matemáticamente puede ser medir cuando se relaciona lo real menos lo pronosticado. Por consiguiente desde el marco de la complejidad una ventana de investigación seria ayudar planificadores de manufactura a administrar cuales son los niveles adecuados de complejidad que un sistema puede tener.

2.5 Tipificación de la complejidad en sistemas de manufactura

Dentro de un sistema de manufactura la complejidad se define con respecto a variables, como origen, cantidad, variedad, tiempo y las relaciones del sistema. De acuerdo con la revisión de la literatura existen varios tipos de complejidad asociadas a estas variables o a la combinación entre ellas. (i) Relacionado con el origen, para [97] las razones que causan la complejidad pueden originarse desde dentro o fuera de la empresa, presentándose tres categorías principales: interna, externa y total. La complejidad interna, se asocia con los flujos dentro del fabricante, y puede estar causada por factores externos a la organización. Estos factores externos constituyen lo que se denomina complejidad externa, la cual se asocia con flujos en la cadena de suministros. Y la

complejidad total, cubre toda la complejidad interna y externa. De acuerdo con el tiempo y su comportamiento, (ii) Dependiendo del tiempo y del comportamiento, para [3] la complejidad en los sistemas de manufactura puede ser estática o dinámica. La complejidad estática se refiere a una característica asociable a los sistemas, y también a los procesos de producción, está ligada con la estructura o diseño de la planta. A diferencia de la complejidad dinámica la cual esta relaciona a los cambios de variables relevantes en el proceso durante un horizonte de tiempo. Según [22] la complejidad interna hace relación a las variables existentes entre los flujos dentro de la fabricación, y la complejidad externa depende de las variables entre los agentes aguas arriba con respecto al proveedor y aguas abajo asociadas con el cliente. De acuerdo con [98] la complejidad estática es aquella en donde las variables no cambian a lo largo del tiempo, caso contrario sucede con la complejidad dinámica donde las variables evolucionan con respecto al tiempo. Más concretamente [4][3][99-101] determinan y establecen que la complejidad estática es la que estudia la parte estructural del sistema y la complejidad dinámica estudia la incertidumbre en el comportamiento de esas operaciones. En síntesis, de acuerdo con la revisión de la literatura dentro del campo científico de manufactura de los tipos complejidad prevalece la interna, estática y dinámica, donde se considera internamente en la empresa su estructura sobre los procesos y/o productos y a su vez el comportamiento de las variables existentes en un horizonte de tiempo, lo que conllevan a la generación de incertidumbre. En la tabla 2 se presenta una revisión de estudios de complejidad realizados en los diferentes tipos de complejidad.

Tabla 2. Revisión de tipos de complejidad en sistemas de manufactura

Tipo	Autores
Interna Estática	Deshmukh et al. (1998) [4]; Wildemann (2000) [102]; Novak and Eppinger (2001) [87]; Meijer (2002) [103]; Perona and Miragliotta (2004) [16]; Seuring et al. (2004) [104]; Hoole (2005) [105]; Gabriel (2007) [106]; Efthymiou et al. (2012) [69]; Haumann et al., (2012) [107]; Park and Kremer (2015) [108]; Arredondo et al. (2017) [109]; Modrak and Soltysova (2017) [110].
Interna Dinámica	Karp and Ronen (1992) [111]; Wilding (1998) [86]; Sivadasan et al. (2002) [112]; Makui and Aryanezhad (2002) [113]; Childerhouse et al. (2002) [114] ; Childerhouse and Towill (2003) [115]; Childerhouse and Towill (2004) [116]; Blackhurst et al. (2004) [117]; Größler et al. (2006) [118]; Sivadasan et al. (2006) [25]; Wu et al. (2007) [24]; Huatuco et al. (2009) [68]; Sivadasan et al. (2010) [120]; Isik (2010) [97]; Jacobs and Swink (2011) [121]; Isik (2011) [122]; Vrabic and Butala (2012) [123]; Gimenez et al. (2012) [91]; Chryssolouris et al. (2013) [43]; Efthymiou et al. (2014) [124]; Hwang and Yuan (2014) [125]; Blome et al., (2014) [92]; Fisci et al. (2015) [126]; Huang et al., (2018) [127].
Interna Estática Dinámica	Frizelle & Woodcock (1995) [99]; Calinescu et al. (1998) [66]; Towill (1999) [128]; Calinescu (2000) [129]; Sivadasan et al. (2002) [112]; Vachon and Klassen (2002) [89]; Efsthathiou et al. (2002) [130]; Perona and Miragliotta (2004) [16]; Sivadasan et al. (2004) [131]; Blecker et al. (2005) [132]; Hu et al. (2008) [133]; Donner et al., (2008) [134]; Windt et al., (2008) [135]; Bozarth et al., (2009) [22]; Gullander et al., (2011) [136]; Zhang (2011) [137]; Elmaraghy et al. (2012) [70]; Smart et al. (2013) [138]; Serdarasan (2013) [139]; Efthymiou et al. (2016) [19]; Coronado (2016) [20].

2.6 Fuentes de complejidad en sistemas de manufactura

En los sistemas de manufactura es importante mitigar la complejidad, para eso se deben identificar los factores relevantes que inciden en los indicadores de desempeño. De acuerdo con [140][14] existen factores determinantes en la complejidad de la fabricación como: (i) la estructura del producto, que hace relación a los componentes, partes subensambles, (ii) la estructura de la planta, hace referencia al número de recursos físicos necesarios, (iii) la planificación de la producción que está asociada con la cantidad de productos a producir, cuando se debe producir y la secuenciación de las ordenes de producción; (iv) el flujo de información entre agentes, departamentos y estaciones de trabajo, (v) la incertidumbre producto de la variabilidad en los recursos y (vi) las reglamentaciones y normatividades. En la Tabla 3 se presenta un conjunto de factores de acuerdo al tipo de complejidad y de acuerdo al origen, las cuales han sido identificadas y/o tratadas por diversos autores como fuentes de complejidad.

Tabla 3. Revisión de fuentes de la complejidad en sistemas de manufactura

Tipo	Fuente	Autores
Interna Estática	Número de productos	Größler et al. (2006) [118]; Bozarth et al. (2009) [22]; Serdarasan (2013) [139]; Park and Kremer (2015) [108]; Coronado (2016) [20]; Arredondo et al. (2017) [109]; Modrak and Soltysova (2017) [110].
	Número de partes	Vachon & Klassen (2002) [89]; Seuring et al. (2004) [104]; Gabriel (2007) [106]; Bozarth et al. (2009) [22]; Coronado (2016) [20]; Modrak and Soltysova (2017) [110].
	Estructura del producto	Calinescu et al. (1998) [66]; Perona and Miragliotta (2004) [16]; Gabriel (2007) [106]; Elmaraghy et al. (2012) [70]; Coronado (2016) [20].
	Número de estaciones	Elmaraghy et al. (2012) [70]; Modrak and Soltysova (2017) [110].
	Distribución en planta	Calinescu et al. (1998) [66]; Größler et al. (2006) [118].
Interna Dinámica	Volumen de producción	Childerhouse et al. 2002 [114]; Perona and Miragliotta (2004) [16]; Größler et al. (2006) [118]; Bozarth et al. (2009) [22].
	Planificación producción	Calinescu et al., (1998) [66]; Bozarth et al., (2009) [22]; Serdarasan, (2013) [139]; Coronado (2016) [20].
	Incertidumbre en el proceso	Elmaraghy et al. (2012) [70]; Serdarasan (2013) [139]; Hwarng and Yuan (2014) [125]; Coronado (2016) [20]; Huang et al. (2018) [127].

Revisando la literatura en cuanto a la complejidad estática se ha estudiado que tiene un efecto negativo sobre la productividad y la calidad [23], dado que un elevado número de productos y/o la variedad de sus componentes genera dificultades en el diseño y operación de las líneas de montaje [133]. Así mismo, la complejidad estática relacionada con el producto tiene un impacto negativo sobre los costos de producción [141], por lo que a mayor complejidad dinámica, hay mayores costos [142]. Los expertos afirman que existen tres estrategias principales para combatir los efectos negativos de la complejidad: evitarla, reducirla o controlarla [26]. Estudios de Bick & Drexl-Wittbecker (2008) [26] afirman que el 25% de los costos totales de las compañías manufactureras se debe a la complejidad existente dentro del proceso y las distintas características asociadas al

producto. En síntesis las empresas industriales deben tomar decisiones para evitar, reducir o controlar la complejidad. De acuerdo con [27], la utilización de recursos informáticos y tecnológicos es destacadamente reconocida en la gestión de la complejidad. En [139], se presenta un conjunto de estrategias de solución ligadas con las tecnologías de apoyo para reducir o eliminar la complejidad en escenarios de manufactura (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Estrategias de gestión para la solución de la complejidad

Tipo de Complejidad	Estrategia de Solución
Interna Estática	Reducir el número de productos. Reduciendo las opciones en el producto y referencias Reducción de los asociados de la subcontratación. Reducción de los centros de trabajo.
Interna Dinámica	Estandarización de operaciones. Automatización de procesos. El intercambio de información. Tercerización de logística. Planificación a corto plazo. Gestión de la demanda y pronósticos. Mejora y rediseño de procesos.

De la literatura sobresalen diferentes tipos de métodos que podrían ser aplicados para mitigar los efectos producidos por la complejidad y a su vez poner en prácticas las distintas estrategias de solución. En la Tabla 5 se listan algunas herramientas del campo de la gerencia de operaciones recopiladas a partir de las investigaciones desarrolladas por Surana et al. 2005 [143]; Baldwin et al. 2010 [144]; Serdarasan, 2013 [139]; Arredondo et al., 2014 [145] y Coronado 2016 [20].

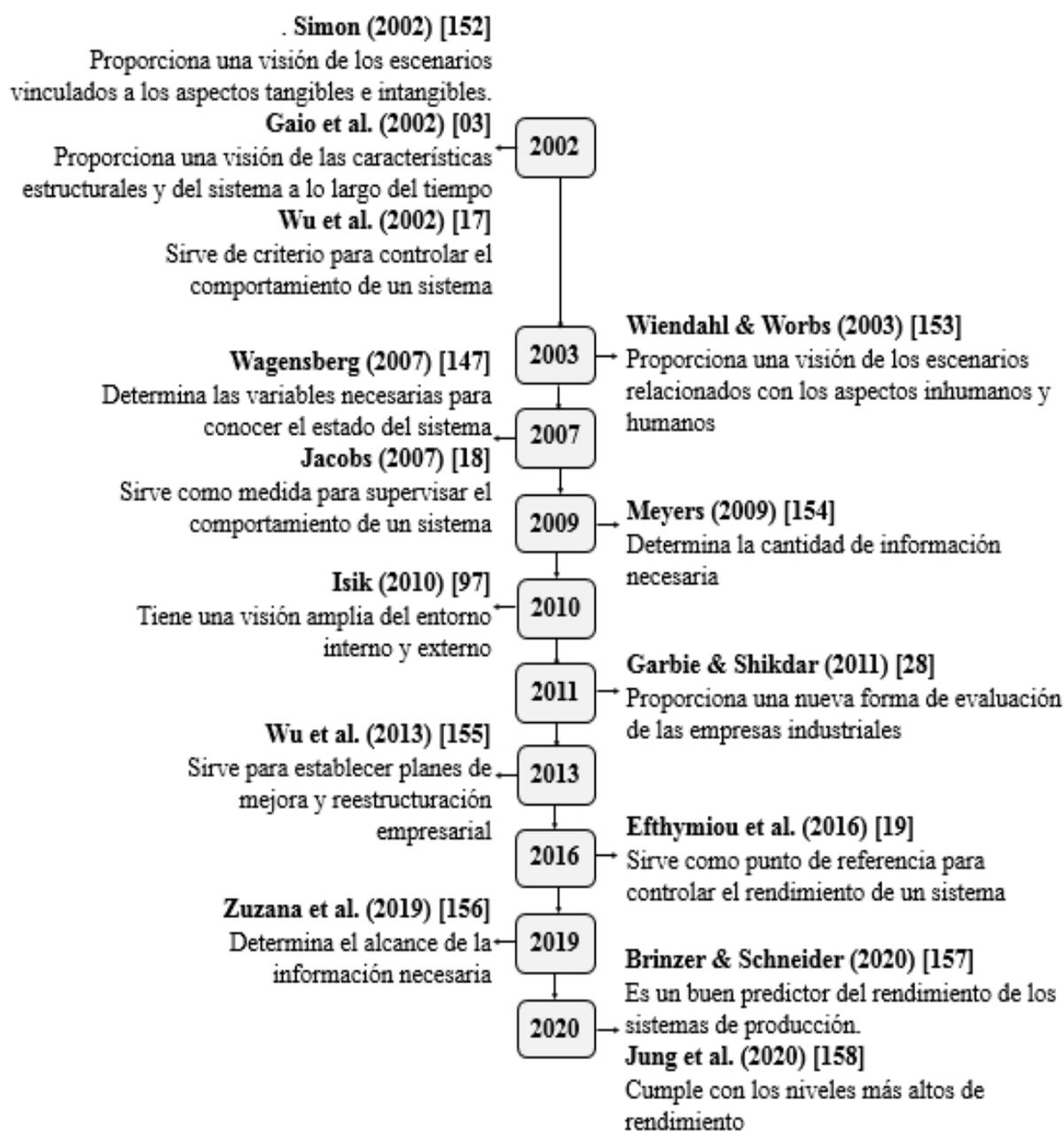
Tabla 5. Metodologías y herramientas de gestión para la solución en sistemas de manufactura

Tipo de complejidad	Metodologías y herramientas de solución	Campo de aplicación
Interna Estática Dinámica	Planificación de recursos empresariales (ERP) Administración de relaciones con el cliente (CRM)	Administración de Cadena de Suministros
	Teoría de restricciones (TOC) Planificación de necesidades de material (MRP)	Administración de la Producción
	Mapeo de flujo de valor (VSM) Cinco eses (5'S) Justo a tiempo (JIT) Reducción del tiempo de matrícula (SMED) Sistemas de tarjetas (Kanban) Mantenimiento productivo total (TPM) Nivelación de la producción (HEINJUNKA) Mejora continua (KAISEN)	Gerencia Moderna de Operaciones
	Control total de calidad (TQM) Control estadístico de procesos (SPC) Diseño para la calidad (QFD)	Administración de la Calidad

2.7 Medición de la complejidad en sistemas de manufactura

El estudio de la complejidad comprende una visión amplia que envuelve distintos escenarios ligados a aspectos inhumanos, humanos e intangibles [31][146]. Desde un enfoque sistemático [34] establece que la complejidad del sistema debe ser coherente al volumen de información necesaria. De igual forma [147] la definen como la magnitud de variables necesarias para determinar el estado del sistema. Entrando a un entorno industrial [28], afirman que la complejidad ha empezado a considerarse como una nueva forma de evaluación de las empresas industriales, siendo además una de las herramientas útiles para el análisis de mejoras y la reestructuración empresarial.

Figura 3. Aspectos de importancia de la medición de la complejidad



Fuente: Elaboración propia

En síntesis los sistemas de manufactura son complejos, es por esto que diversos autores han

incursionado en búsqueda de que los sistemas de fabricación sean más simplificados, para esto algunos han tomado parámetros clásicos de comparación como el tiempo de fabricación [148], los recorridos o distancia entre las estaciones [149], los costos de manejo de materiales [150], la calidad del producto [151]. De acuerdo con [99] la medición de la complejidad en sistemas e manufactura es una métrica que sirve de parámetro para establecer planes de mejoramiento, a cabo se establecen que los sistemas con alto grado de complejidad tienden a tener mayor número de problemas en comparación con los sistemas que son más simples. Dado lo anterior, la medición de la complejidad en sistemas de manufactura permitirá a los encargados de la gestión, investigar y comparar diferentes tipos de configuraciones, estructuras y diseños, evaluar el comportamiento de los sistemas y facilitar precisión en la toma de decisiones. En la figura 3 se identifican diferentes aportes de autores en donde se describen aspectos de importancia de medir la complejidad en la gestión de la fabricación.

2.8 Consideraciones para la medición de la complejidad en manufactura

La medición de la complejidad es una métrica objetiva, por lo que se obtiene de datos obtenidos de forma confiable a partir de la vigilancia constante del sistema. Es de vital importancia si por parte de la gerencia se necesita una medida útil y válida que apoye en las decisiones. El investigador [142] argumentó que, además de la validez, la métrica de la complejidad debe considerar mediciones aditivas por separado, de esta forma se simplifica el cálculo y se proporciona un mejor análisis. De acuerdo con [99] al momento de realizar la medición de la complejidad, hay que considerar por un lado la estructura del sistema y por otro la incertidumbre del sistema. Según [4] hay que considerar el volumen de productos, cantidad de procesos y la cantidad de máquinas.

Tabla 6. Consideraciones en la medición de la complejidad

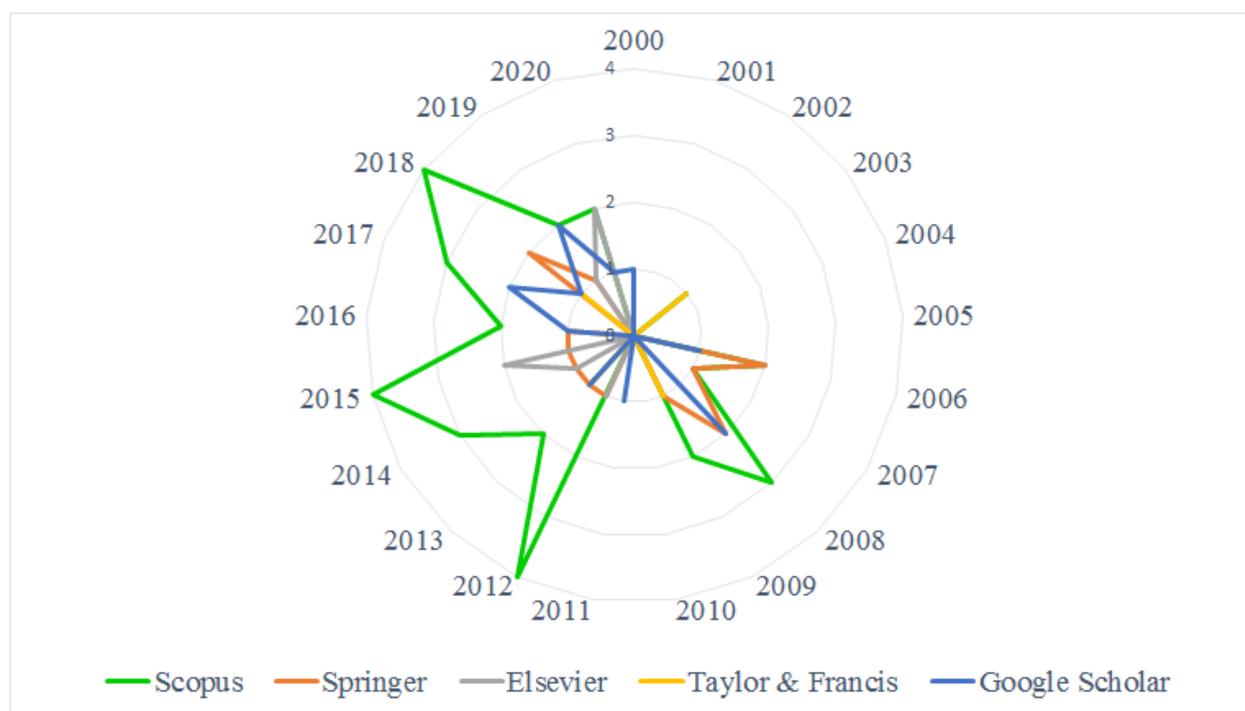
Año	Cantidad de productos	Volumen de recursos	Estructura del sistema	Incertidumbre	Medidas aditivas
2020			Jung et al. (2020) [158]		
2019			Zuzana et al. (2019) [156]	Gomes et al. (2019) [159]	
2018	Modrak & Soltysova (2018) [160]	Modrak & Soltysova (2018) [160]		Huang et al. (2018) [127]	
2016	Coronado (2016) [20]			Coronado (2016) [20]	
2015	Park & Kremer (2015) [108]				
2013	Serdarasan (2013) [139]	Vanmali et al. (2013) [161]		Serdarasan (2013) [139]	Serdarasan (2013) [139]
2012		Elmaraghy et al. (2012) [70]		Elmaraghy et al. (2012) [70]	
2009	Bozarth et al. (2009) [22]	Bozarth et al. (2009) [22]			Bozarth et al. (2009) [22]
2006	Größler et al. (2006) [118]		Größler et al. (2006) [118]		Größler et al. (2006) [118]
2004		Seuring et al. (2004) [104]			Perona & Miragliotta (2004) [16]

La tabla 6 muestra las consideraciones que de acuerdo a los autores relacionados, hay que tener en cuenta para la medición de complejidad en sistemas de fabricación: (i) Cantidad de productos, (ii) Volumen de recursos, (iii) Estructura del sistema, (iv) Incertidumbre y (v) Medidas aditivas para el cálculo. Es evidente la recomendación de los investigadores en los últimos años hacia elementos como la estructura del sistema y la incertidumbre.

2.9 Aspectos relevantes en la medición de la complejidad en manufactura

Una búsqueda en cada una de las bases de datos permitió poder encontrar aspectos de alta relevancia en la medición de la complejidad de sistemas de manufactura. A partir de lo anterior, se estructuró una ruta específica: ("Complexity" AND "Manufacturing" OR "Production" AND "Measuring" OR "Measurement"). Se encontró un cierto número de publicaciones relacionadas con el tema de investigación. La figura 4 muestra el volumen por año en cada fuente consultada. Los resultados muestran un elevado desarrollo de la investigación en los últimos 10 años.

Figura 4. Volumen de publicaciones por año en base de datos



Es importante destacar autores con mayor número de citas, lo que es un indicio de la calidad de las contribuciones y de la generación de nuevos conocimientos para la ciencia. La tabla 7 muestra el número de citas por trabajo publicado, destacando la prevalencia de citas en las bases de datos de Springer y Elsevier. Sobresalen autores como Andersson & Bellgran (2015) [162]; Fera et al. (2018) [163]; Broniatowski & Moses (2016) [164] y Smart et al. (2013) [138]. En cuanto a la contribución a la medición de la complejidad, es notorio en los últimos diez años un incremento en la consideración de factores como el diseño o estructura (Ds) y el proceso (Pr). Y el poco desarrollo hacia elementos como personas (Pe), productos (Pd), planificación y programación (Ps).

Tabla 7. Relación de citas y elementos relevantes en la medición de sistemas de manufactura

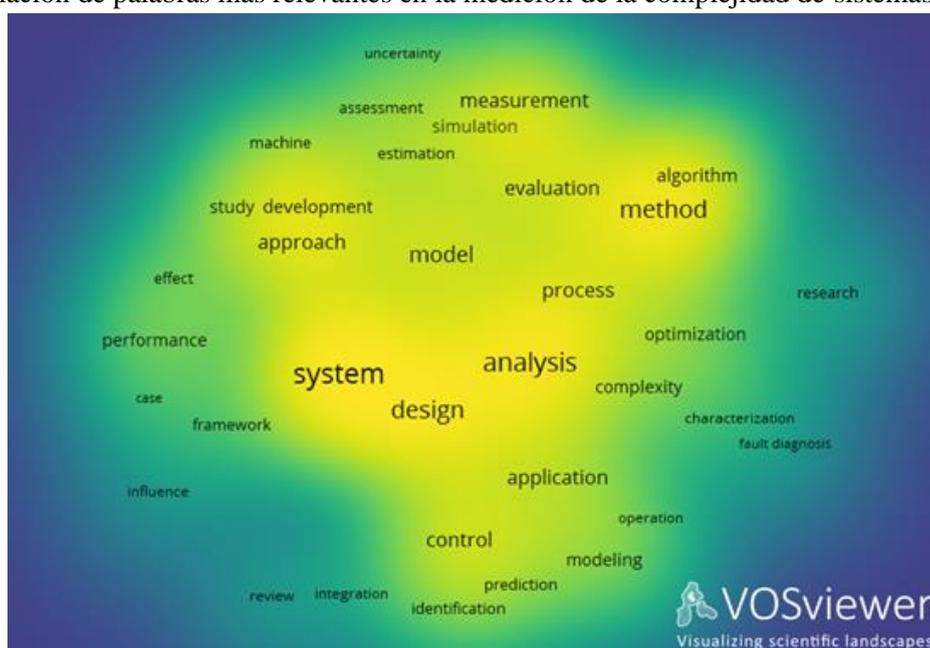
Autores	Citas	Ds	Pr	Pd	Pe	Ps
Turco & Maggioni (2020) [165]	6				•	
Brinzer & Schneider (2020) [166]	2		•		•	
Jung et al. (2020) [158]	0	•				
Gomes et al. (2019) [159]	6		•			
Zuzana et al. (2019) [156]	0		•			
Juffs & Han (2019) [167]	0		•			
Fera et al. (2018) [163]	52		•			
Kavilal et al. (2018) [168]	17	•				
Modrak & Soltysova (2018) [160]	14	•				
Hamta et al. (2018) [169]	12	•				
Guoliang et al. (2017) [170]	15	•				
Brinzer & Banerjee (2017) [157]	12				•	
Raihanian & Behdad (2017) [171]	3	•				
Fan et al. (2017) [172]	0	•				
He et al. (2017) [173]	0		•			
Broniatowski & Moses (2016) [164]	46	•				
Schlick & Demissie (2016) [174]	0		•			
Andersson & Bellgran (2015) [162]	117		•			
Jonsson & Ivert (2015) [175]	36					•
Drzymalski (2015) [176]	9		•			
Townsend & Urbanic (2015) [177]	7		•			
Youn (2014) [178]	31		•			
Schoettl et al. (2014) [179]	5	•				
Modrak & Marton (2014) [180]	0	•				
Smart et al. (2013) [138]	42					•
Malone & Wolfarth (2013) [181]	15		•			
Grussenmeyer & Blecker (2013) [182]	5		•			
Zhang, Z. (2012) [183]	37					•
Mattsson et al. (2012) [184]	30	•	•	•	•	
Gravier & Kelly (2012) [185]	3	•				
Ma et al. (2012) [186]	1				•	
Mattsson et al. (2011) [187]	25	•	•	•	•	

La figura 5 muestra un estudio más detallado, teniendo en cuenta las publicaciones más actuales, proporcionando así un espectro de posibles trabajos futuros en esta área de investigación.

Figura 5. Espectro de investigaciones futuras hacia la medición de la complejidad

2018	2019	2020
<p>Fera et al. (2018) [163] Análisis del impacto económico de las decisiones relacionadas con el aumento de recursos y productos en la producción</p>	<p>Zuzana et al. (2019) [156] Examinar mediante aspectos metodológicos la medición de la complejidad dinámica del sistema de producción.</p>	<p>Turco & Maggioni (2020) [165] Determinar una medida apropiada del contenido de complejidad del trabajo a nivel de producto o proceso.</p>
<p>Kavilal et al. (2018) [168] Medir la complejidad basándose en metodologías de investigación cualitativas, computacionales y de simulación de eventos discretos</p>	<p>Gomes et al. (2019) [159] Aplicar las métricas de complejidad a los aspectos humanos en los sistemas de fabricación.</p>	<p>Brinzer & Schneider (2020) [166] Calcular la complejidad adecuada para los trabajos, en diferentes tipos de procesos.</p>
<p>Modrak & Soltysova (2018) [160] Estudiar la desviación del punto de equilibrio de la complejidad del proceso de fabricación</p>		<p>Jung et al. (2020) [158] Vincular una métrica de complejidad a un proceso formalizado de arquitectura y diseño de sistemas.</p>
<p>Hamta et al. (2018) [169] Medición de los costos asociados al aumento de la complejidad estructural en los sistemas de fabricación</p>		

A partir de la información de Scopus y mediante el soporte informático VosViewer, se desarrolló un estudio de las palabras más utilizadas teniendo en cuenta 6489 términos, incluidos los títulos, el resumen y las palabras claves, permitiendo visualizar un enfoque de la investigación sobre la medición de la complejidad. La figura 6 muestra una clara tendencia en los estudios de casos de sistemas de diseño y fabricación, que utilizan métodos de medición cuantitativos orientados a modelos, como la optimización, los algoritmos y la simulación de procesos.

Figura 6. Relación de palabras más relevantes en la medición de la complejidad de sistemas manufactura

2.10 Métodos y enfoques para medir la complejidad en sistemas de manufactura

Según [124] los enfoques más comunes para medir la complejidad abordada en la literatura son la dinámica no lineal (DT), la teoría de la información (IT), los métodos híbridos (H), otros enfoques (OA) y los métodos índices cuantitativos (QI).

2.10.1 Teoría del caos y la dinámica no lineal

La dinámica no lineal es un conjunto de técnicas matemáticas de la teoría del caos que se utilizan para la medición de la complejidad dinámica [42], de acuerdo con [188] la teoría del caos es un análisis teórico y descriptivo sobre la conducta inestable de los sistemas dinámicos, entendiéndose por dinámico la evolución del sistema en el tiempo, inestable a la ausencia de patrones repetitivos y no lineal dado que lo que sale no es proporcional a lo que entra en un sistema. De acuerdo con [69], en la teoría del caos y la dinámica no lineal existen tres tipos de métodos que se utilizan para medir la estabilidad de un sistema, (i) Retratos de fase (PP), Según [189-191] es un método gráfico es aplicable para mirar el dinamismo del sistema por medio de mapas. Consecuentemente [134] por medio de la simulación de eventos discretos dinámicos no lineales, estudian y evalúan los sistemas de manufactura en escenarios empujar (push) y halar (pull) para el control de la producción. (ii) Exponentes de Lyapunov (LE), este método permite evaluar el comportamiento inestable de los sistemas dinámicos. De acuerdo con [192], los exponentes de Lyapunov son medidas que permiten cuantificar la sensibilidad de un sistema, cuando este contiene por lo menos un exponente de tipo positivo se define como inestable y dependiendo de la magnitud en un horizonte de tiempo se puede visualizar su dinamismo.

Desde un entorno industrial aparecen autores como [193] quienes analizan el dinamismo caótico mediante el uso de exponentes de Lyapunov, de igual forma [194] emplea el método para el control de inventarios a partir de la diversificación de los lotes de productos para una demanda inestable. (iii) Diagramas de bifurcación (BD), Este método permite mediante un esquema gráfico mostrar el comportamiento de un proceso de manufactura, de manera que se puedan identificar los elementos y parámetros que conllevan a una conducta de tipo inestable. Algunos investigadores han desarrollado trabajos con este tipo de métodos, dado el caso desarrollado por [195] quienes controlan sistemas de manufactura basados en diagramas de bifurcación, específicamente en el proceso de gestión de inventarios. En [193] se evalúa gráficamente la inestabilidad de un sistema de manufactura mediante el análisis de la gestión de la demanda, teniendo en cuenta métodos cuantitativos de serie de tiempo.

Las consultas de búsqueda utilizadas se muestran a continuación: ("Complexity" AND "Method" AND "Phase Portraits"); ("Complexity" AND "Method" AND "Lyapunov Exponents"); ("Complexity" AND "Method" AND "Bifurcation Diagrams"). La tabla 8 muestra una revisión de los métodos de medición de la complejidad utilizando técnicas matemáticas de la teoría del caos, identificando tres efectos sobre la complejidad dinámica (i) Volumen de producción, (ii) Planificación y programación de la producción y (iii) Incertidumbre del proceso. El predominio del método de los Exponentes de Lyapunov (LE) es evidente, siendo el efecto de la planificación y programación de la producción menos analizada.

Tabla 8. Relación y evaluación con respecto a la teoría del caos y la dinámica no lineal (DT)

Método	Autores	Dinámica			Evaluación
		I	II	III	
Retratos de fases	Pan and Chen (2016) [196]			●	Tiempo de inactividad y productividad del equipo
	Donner et al. (2008) [134]		●		Estrategias de control de desempeño
	Giannelos et al. (2007) [191]		●		Retrasos en los plazos de entrega
	Peters and Worbs (2004) [189]			●	Tiempo de rendimiento y tasas de producción.
	Chryssolouris et al. (2004) [190]		●		Retrasos en los plazos de entrega
Exponentes de Lyapunov	Ma et al. (2019) [199]	●			Velocidad de ajuste y descuento de precios
	Ndofor et al. (2018) [197]			●	Nivel de imprevisibilidad en los sectores productivos
	Guo (2018) [198]			●	Identificación de parámetros caóticos
	Yu et al. (2017) [200]			●	Análisis del precio de cierre diario
	Donner et al. (2015) [201]			●	Transiciones dinámicas en sistemas no estacionarios
	Leverick et al. (2015) [202]			●	Comparación de características dinámicas a largo plazo
	Elias and Narayanan (2014) [203]	●			Transiciones de operación y material de trabajo
	Wolf et al. (2014) [192]	●			Control de la tasa de crecimiento del volumen
	Chryssolouris et al. (2013) [43]			●	Relación entre flexibilidad y complejidad
	Sun and Wu (2012) [204]			●	Análisis de estabilidad de sistemas no lineales
	Yan et al. (2012) [205]			●	Cambios dinámicos del estado de la máquina
	Benaissa et al. (2008) [206]			●	Comportamiento dinámico de sistemas dinámicos
	Papakostas and Mourtzis (2007) [193]	●			Adaptabilidad de un sistema de fabricación
	Makui and Madadi (2007) [207]	●			Comportamiento de la cadena de suministro
Diagramas de bifurcaciones	Ma et al. (2019) [199]	●			Velocidad de ajuste y descuento de precios
	Kwuiy et al. (2014) [208]			●	Nivel de complejidad y transición de movimiento.
	Wang et al. (2010) [209]	●			Capacidad de producción con comportamientos caóticos
	Papakostas and Mourtzis (2007) [193]	●			Adaptabilidad de un sistema de fabricación
	Scholz-Reiter et al. (2002) [195]		●		Comportamiento dinámico del sistema de producción

2.10.2 Teoría de la información

La teoría de la información tiene sus inicios a partir del trabajo desarrollado por [210], quien introduce una métrica de cuantificación de la información, tomado como nombre medida de entropía y se utiliza para medir la incertidumbre de variables aleatorias dentro de un sistema. Esta medida fue llevada a un ámbito industrial, para calcular la complejidad de los sistemas de manufactura gracias a los trabajos investigativos de [99]. De acuerdo con [112][129], la teoría de la información mide que tan complejo es un sistema dependiendo del volumen de información.

De acuerdo con [69], en la teoría de información existen tres tipos de métodos de medición, (i) Entropía de Shannon (SE), que se fundamenta en ecuaciones analíticas para medir la complejidad, facilitando el análisis entrópico en diferentes tipos de escenarios y proporcionando una base cuantitativa para la toma de decisiones. Se destacan algunos autores que aplicaron este tipo de método en sistemas de manufactura como [4], quien se basó en la entropía para medir la complejidad en sistemas de tipo taller. Consecuente a esto, [130] utiliza la métrica entrópica para evaluar la complejidad estática y dinámica en sistemas de manufactura. Desde una visión de cadenas de suministros, [97] proponen una medición de la complejidad estática y dinámica total en la cadena de suministro. De igual forma [211], identifican la mejor configuración de una red de suministros a partir de la medición de la entropía de la complejidad. Más recientemente [212], abordan modelos estructurales basados en la entropía de Shannon para estudios de ingeniería sostenible. (ii) E-Machines (EM), este método es utilizable en la medición de la complejidad dinámica, a partir de los distintos estados que pueden tener una máquina en un horizonte de tiempo. Para esto se hace una evaluación de la complejidad mediante la medida de entropía considerando estados como activa, inactiva, averiada, en alistamiento, entre otras. En la práctica aparecen investigaciones como la de [4] quienes evaluaron el rendimiento y la complejidad de un sistema a partir de las consideraciones de capacidad de las máquinas y las probabilidades de los distintos estados. De igual forma [213] trabajaron un proyecto de investigación bajo un enfoque de simulación de la complejidad en términos de probabilidad de los estados de las máquinas considerando las cantidades de productos y costos de inventarios. (iii) Kolmogorov (K), este método proporciona una medida de complejidad entrópica que permite evaluar y analizar el comportamiento durante el tiempo de los distintos componentes de fabricación. Desde la aplicabilidad se destaca el trabajo desarrollado por [214][215], quienes estudian la incertidumbre de los indicadores de desempeño en sistemas de producción centralizada y descentralizada en cadenas de suministros. Las consultas de búsqueda utilizadas se muestran a continuación: ("Complexity" AND "Method" AND "Shannon Entropy"); ("Complexity" AND "Method" AND "E-Machines"); ("Complexity" AND "Method" AND "Kolmogorov"). La tabla 9 muestra una revisión de los estudios de medición de la complejidad con respecto a la Teoría de la Información (TI). Se han identificado cinco efectos sobre la complejidad estática (i) Número y variedad de productos, (ii) Número de piezas, (iii) Estructura del producto, (iv) Número de máquinas o centros de trabajo y (v) Distribución de planta. Y tres efectos sobre la complejidad dinámica ya definidos en el apartado anterior. Predomina el método de Kolmogorov (K), siendo menos analizado el efecto de la estructura del producto, el volumen de producción y la planificación y programación de la producción.

Tabla 9. Relación y evaluación con respecto a la teoría de la información (TI)

Método	Autores	Estática					Dinámica			Evaluación
		I	II	III	IV	V	I	II	III	
Entropía de Shannon	Zuzana et al. (2019) [156]				•					Análisis de la complejidad estática
	Zhang et al. (2017) [216]								•	Ruta más corta en redes complejas
	Manns et al. (2016) [217]							•		Variación del movimiento humano basada en datos
	Sharma et al. (2016) [218]		•		•					Diagnóstico de fallas y severidad en rodamientos
	Modrak et al. (2014) [219]	•								Variedad de productos en procesos complejos
	Modrak and Marton (2013) [220]	•		•						Correlación entre cadenas de suministro
	Modrak and Semanco (2012) [211]		•							Identificar una mejor variante de configuración
	Modrak and Marton (2012) [221]		•							Diseño estructural de la cadena de suministro
	Isik (2010) [97]		•	•						Complejidad de los flujos de información y materiales
	Bone et al. (2010) [222]	•	•	•						Correlación entre la arquitectura del sistema
	Efstathiou et al. (2002) [130]		•						•	Evaluación de la complejidad estructural y dinámica
E-Machines	Vanmali et al. (2013) [161]		•		•	•				Análisis de la complejidad estática
	Kamrani and Adat (2008) [223]	•								Riesgos asociados con la variedad de productos
	Park et al. (2006) [224]								•	Índice de precios de acciones
	Elmaraghy et al. (1998) [225]				•			•		Mínimizar el intervalo de espera y el tiempo de flujo
Kolmogorov	Fan et al. (2018) [226]				•					Tiempo de operación y altas tasas de error humano
	Mizgier (2017) [227]	•								Riesgo de la cadena de suministro
	Jiang et al. (2015) [228]				•					Defectos de cojinetes en máquinas
	Kandjani et al. (2015) [229]							•		Complejidad de proyectos en etapa de planificación
	Mourtzis et al. (2015) [215]						•	•		Rendimiento en fabricación descentralizadas
	Leverick et al. (2015) [202]								•	Comparación de características dinámicas
	Cui et al. (2015) [230]								•	Información del sistema de control
	Li et al. (2014) [231]								•	Reducir la complejidad de los datos
	Modrak and Marton (2013) [220]	•		•						Correlación entre cadenas de suministro
	Yusuf et al. (2013) [232]					•			•	Complejidad de la ubicación de las existencias viables
	De Biagi and Chiaia (2013) [233]					•				Robustez estructural
	Mourtzis et al. (2013) [214]	•				•	•			Diseño y operación de redes de fabricación
	Allaire et al. (2012) [234]								•	Asignación de recursos para reducir la complejidad
	Elmaraghy et al. (2012) [235]	•	•	•		•				Complejidad de diseño, productos y fabricación
	Khan and Angeles (2011) [236]								•	Complejidad de cadenas cinemáticas
	Isik (2010) [97]		•	•						Complejidad de los flujos de información y materiales
	Frizelle and Suhov (2008) [237]	•					•		•	Comparaciones efectivas con colas en el sistema
	Li and Chandra (2007) [238]								•	Integración de conocimientos genéricos
Frizelle and Suhov (2001) [239]	•					•		•	Comportamiento de las colas en el sistema	

2.10.3 Índice cuantitativo

Los métodos del índice cuantitativo son las técnicas que permiten medir la complejidad de los sistemas de fabricación desde una perspectiva analítica, estos métodos son utilizados comúnmente en países europeos. En la literatura existen varios métodos como: (i) Calculador de Complicación (CXC), desarrollado por [240] en un proyecto de investigación aplicada denominado Belgian Complex, en el que su objetivo era caracterizar la complejidad de puestos de trabajo específicos (ii) Índice de Complejidad (CXI), Según [241] este método ayuda a las empresas a entender su sistema de producción basándose en la experiencia de los trabajadores. (iii) Índice de Complejidad de Fabricación (ICF), ese modelo fue planteado por [242], que a partir de tres elementos como el flujo de información, la diversidad y la variabilidad miden la complejidad de un sistema de fabricación. (iv) Índice de Robustez (IR), desarrollado por [241], quienes determinan la capacidad de producción de un sistema y, a partir de los cambios en el desarrollo del producto, identifican si el sistema es robusto.

Las consultas de búsqueda utilizadas se muestran a continuación: ("Complexity" AND "Method" AND "Complexity Calculator"); ("Complexity" AND "Method" AND "Complexity Index"); ("Complexity" AND "Method" AND "Manufacturing Complexity Index"); ("Complexity" AND "Method" AND "Robustness Index"). La tabla 10 muestra poco desarrollo efectos hacia el número de piezas y la planificación y programación de la producción.

2.10.4 Enfoque híbrido

En algunas investigaciones se proponen enfoques de tipo híbrido, esta nace de la combinación entre la teoría de información e índices cuantitativos [243][244]. Los métodos cuantitativos son aquello que clasifican los productos, los recursos y las maquinas en función a unos criterios de cantidad y atributos. En la literatura sobresalen algunos trabajos investigativos en [106][244] proponen una medición de la complejidad en base a teoría de información teniendo en cuenta características del producto y del proceso, en esta investigación miden el efecto de los recursos dentro del sistema de manufactura. Consecuentemente, [245] determinan la medición de la complejidad en sistemas manufactura considerando aspectos como la disponibilidad en los recursos utilizados. En [246] se muestra un indicador que permite medir la complejidad a partir del conocimiento del número de estaciones y vínculos entre ellos. Más recientemente, [247] proponen seis tipos de índices de complejidad en las características de la distribución en planta.

Las consultas de búsqueda utilizadas se muestran a continuación: ("Complexity" AND "Method" AND "Shannon Entropy" AND "Complexity Calculator"); ("Complexity" AND "Method" AND "Shannon Entropy" AND "Complexity Index"); ("Complexity" AND "Method" AND "Shannon Entropy" AND "Manufacturing Complexity Index"); ("Complexity" AND "Method" AND "Shannon Entropy" AND "Robustness Index"). La misma estructura se utilizó para los métodos E-Machines y Kolmogorov. La tabla 10 evidencia una combinación de teoría de la información e índices cuantitativos, mostrando una tendencia a la complejidad estática y una baja proyección a la complejidad dinámica.

Tabla 10. Relación de evaluación con respecto al índice cuantitativo (QI), híbrido (H) y otros enfoques (OA)

Método	Autores	Estática					Dinámica			Evaluación
		I	II	III	IV	V	I	II	III	
Calculador de Complejidad	Van Landeghem et al. (2016) [254]	•	•	•						Impacto en el operador humano dentro de la fabricación
	Tarrar et al. (2016) [255]				•	•				Medir la complejidad para mejorar el trabajo
	Mattsson et al. (2014) [256]								•	Análisis comparativo de métodos cuantitativos
	Zeltzer et al. (2013) [240]				•				•	Complejidad en el desempeño de la producción
Índice de Complejidad	Falck et al. (2017) [257]	•		•	•					Evaluación de la complejidad del ensamblaje
	Mattsson et al. (2016) [258]				•	•				Diseño de la estación, variación del trabajo y perturbaciones
	Mattsson et al. (2014) [256]								•	Análisis comparativo de métodos cuantitativos
	Mattsson et al. (2011) [241]						•		•	Nivel de reequilibrio en líneas de producción
Índice de de Fabricación	Mattsson et al. (2014) [256]								•	Análisis comparativo de métodos cuantitativos
	Urbanic and ElMaraghy (2006) [259]	•			•	•			•	Evaluar elementos de complejidad de fabricación
Índice de Robustez	Mattsson et al. (2014) [256]								•	Análisis comparativo de métodos cuantitativos
	Mattsson et al. (2011) [241]						•		•	Nivel de reequilibrio en líneas de producción
Heurístico	ElMaraghy et al. (2014) [247]				•	•				Complejidad estructural de los sistemas de fabricación
	Romano (2009) [260]	•	•			•				Configuración de redes de suministro
	Németh and Foldesi (2009) [246]		•	•		•				Complejidad y longitud de la cadena de suministro
	Battini et al. (2007) [261]	•	•		•					Análisis de las redes de la cadena de suministro
	Gabriel (2007) [106]				•	•				Complejidad en el desempeño de fabricación
	ElMaraghy et al. (2005) [245]	•	•	•						Análisis del número y variedad de componentes
	ElMaraghy and Urbanic (2003) [244]	•	•	•	•					Efectos de los atributos del trabajador en el sistema
Dinámica de fluidos	Mourtzis and Doukas (2014) [262]						•	•		Diseño y planificación de sistemas y redes
	Romano (2009) [260]	•	•			•				Configuración de redes de suministro
	Efthymiou et al. (2009) [263]							•		Modelización y comprensión del sistema de producción
Cuestionarios	Brinzer & Schneider (2020) [166]	•	•							Identificación de los factores de complejidad relevantes
	Eckstein et al. (2015) [253]	•	•							Efecto moderador de la complejidad del producto
	Blome et al. (2014) [92]	•							•	Transferencia de conocimiento y flexibilidad
	Abdullah et al. (2014) [264]								•	Impacto de la complejidad operativa
	Manuj and Sahin (2011) [15]						•		•	Impulsores de la complejidad de la cadena de suministro
	Bozarth et al. (2009) [22]							•	•	Impacto en el rendimiento de la planta de fabricación
	Größler et al. (2006) [118]								•	Adaptación de procesos ante la creciente complejidad
	Perona and Miragliotta, (2004) [16]	•	•	•					•	El impacto de la capacidad de proceso flexible en el producto
	Novak and Eppinger (2001) [87]	•	•							Complejidad del producto y cadena de suministro
Guimaraes et al. (1999) [252]				•	•				Complejidad del sistema en relación con el rendimiento	

2.10.5 Otros enfoques

En este apartado se encuentran aquellos métodos que no se asocian con ninguno de los enfoques anteriores. De acuerdo con [69], dentro de otros enfoques existen dos tipos de métodos, (i) Dinámica de fluidos (FD), que es utilizado a partir de la estimación de indicadores de desempeño en torno a la planeación, programación y control de la producción [248-251]. (ii) Cuestionarios, que permite medir la complejidad en sistemas a partir de cuestionarios estructurados utilizando escalas Likert, aplicados a gerentes y jefe de producción de las empresas, finalmente los resultados obtenidos son analizados estadísticamente. Dentro de algunos trabajos se destacan [252], en el que se aplicó un cuestionario a una muestra de quinientos gerentes de planta para corroborar el desempeño de un sistema en materia de complejidad. En [22] se utilizan cuestionarios en 209 plantas de fabricación de diversas industrias en siete países de diferentes regiones geográficas del planeta para estudiar que fuentes añaden complejidad y generan un impacto en el desempeño empresarial. Más recientemente [253] a partir de los cuestionarios en 143 empresas alemanas se investiga los efectos de complejidad del producto en la agilidad y adaptabilidad de la cadena de suministro en función del costo y el rendimiento operativo. Las consultas de búsqueda utilizadas se muestran a continuación: ("Complexity" AND "Method" AND "Fluid dynamics"); ("Complexity" AND "Method" AND "Questionnaires"). La tabla 10 muestra la prevalencia del método de los cuestionarios (Q) sobre el método de la dinámica de fluidos (FD), siendo menos analizado el efecto sobre la complejidad estática: Estructura del producto, Número de máquinas o puestos de trabajo y Disposición de la planta, y sobre la complejidad dinámica: Volumen de producción y Planificación y programación de la producción.

2.11 Análisis entre los métodos y enfoques

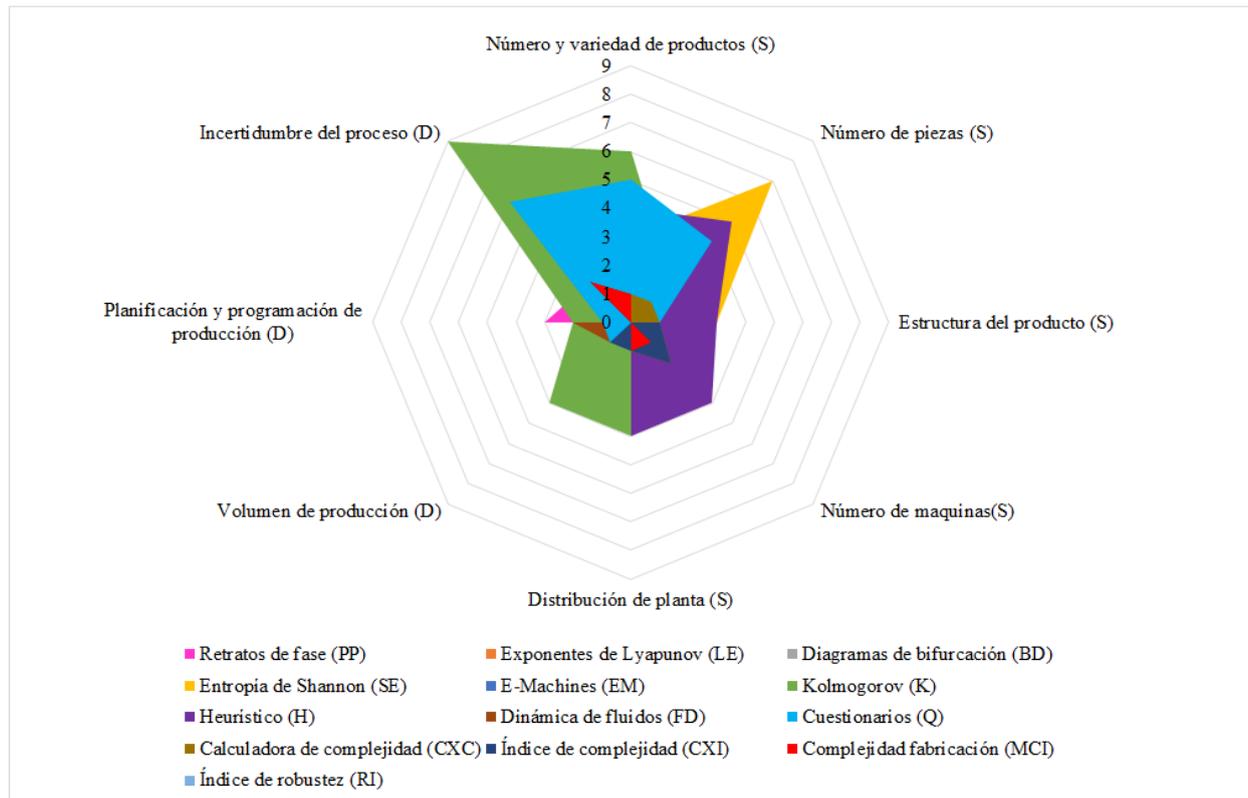
Un primer análisis consiste en una clasificación de los diferentes métodos aplicados para medir la complejidad en los sistemas de manufactura, relacionando diferentes características, tales como: Cualitativo (QI), Cuantitativo (Qn), Estático (S), Dinámico (D), Estático y Dinámico (S&D), Objetivo (O) y Subjetivo (Sb). La tabla 11 evidencia el dominio hacia lo cuantitativo y lo objetivo.

Tabla 11. Comparación de características entre métodos y enfoques

Enfoque	Método	QI	Qn	S	D	S&D	O	Sb
DT	Retratos de fase (PP)		•		•		•	
	Exponentes de Lyapunov (LE)		•		•		•	
	Diagramas de bifurcación (BD)		•		•		•	
IT	Entropía de Shannon (SE)		•			•	•	
	E-Machines (EM)		•			•	•	
	Kolmogorov (K)		•			•	•	
H	Heurístico (H)		•	•			•	
OA	Dinámica de fluidos (FD)		•			•	•	
	Cuestionarios (Q)	•				•		•
QI	Calculadora de complejidad (CXC)		•			•	•	
	Índice de complejidad (CXI)	•	•		•			•
	Complejidad de fabricación (MCI)		•		•		•	
	Índice de robustez (RI)		•		•			•

La figura 8 muestra que de los elementos abordados, el menos analizado es el efecto de la planificación y programación de la producción, el volumen de producción y las características estructurales asociadas al producto y a la planta. Al mismo tiempo, se observa una tendencia hacia la complejidad estática y una baja proyección hacia la complejidad dinámica.

Figura 8. Comparación de diferentes tipos de elementos



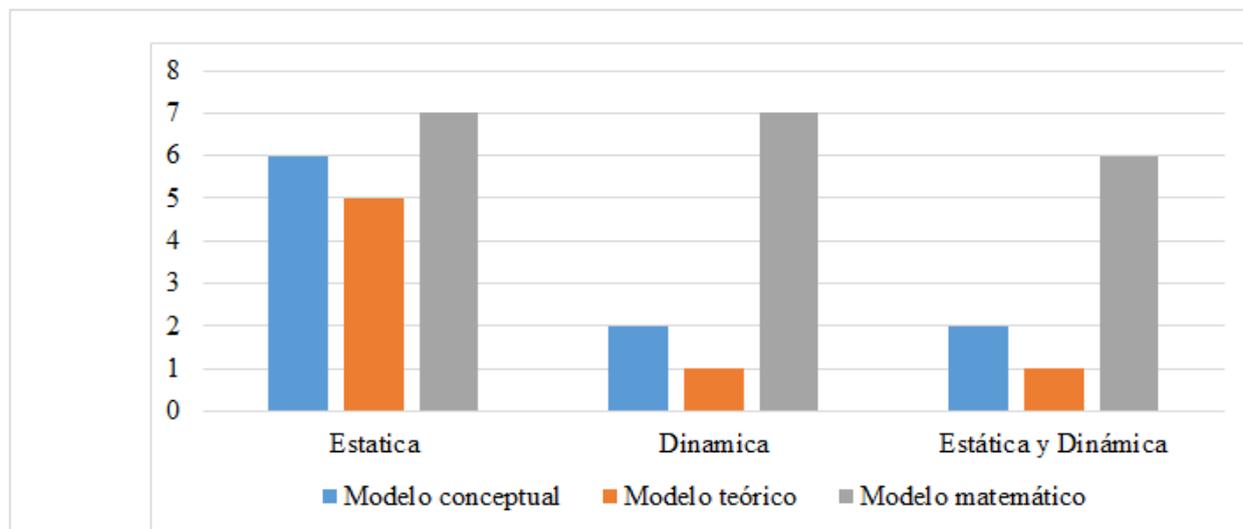
2.12 Tipos de modelos más destacados para medir la complejidad

Existen distintos modelos para medir la complejidad, entre estos se encuentran (i) Modelos conceptuales, (ii) Modelos teóricos y (iii) Modelos Matemáticos. Todos son utilizados para analizar y comprender de manera más fácil el comportamiento de un sistema. En la tabla 13 se relacionan tipos de modelos, tipo de complejidad, autores representativos, y descripción de la evaluación.

A partir de lo desarrollado en la tabla 13, se hace un comparativo ente cada uno de estos modelos. La figura 9 muestra un alto predominio de los diferentes modelos hacia la complejidad estática y un escaso desarrollo hacia la complejidad dinámica y mixta. Al mismo tiempo, cabe destacar una mayor inclinación hacia los modelos matemáticos, que de igual forma se apoyan en modelos conceptuales y teóricos para su ejecución y desarrollo.

Tabla 13. Relación y evaluación de tipos de modelos respecto a los tipos de complejidad

Modelo	Complejidad	Autores	Evaluación
Conceptual	General	Haumann, M. (2012) [107]	Importancia de los factores que influyen en los indicadores de producción.
		Bozarth et al.(2009) [22]	Impacto negativo de la complejidad en sistemas de manufactura.
		Perona and Miragliotta (2004) [16]	Cumplimiento de las metas propuestas a partir de escenarios agresivos.
	Estática	Modrak, V., and Marton, D. (2013) [220]	Definición de una estructura metodológica para líneas de ensamble en cadenas de suministros
		Mattsson et al. (2011) [241]	Medición la complejidad de la producción específicamente por estación de trabajo.
	Dinámica	Dekkers et al. (2012) [265]	Evaluación de proveedores con el fin de identificar el desempeño de un sistema.
	Mixta	Eckstein et al. (2015) [253]	Comprender las interrelaciones una cadena de suministros a partir de una medida de complejidad
Watkins and Kelley (2001) [266]		Complejidad estructural del producto, proceso y de alistamientos de las máquinas.	
Teórico	Estática	Schoenherr (2010) [267]	Complejidad en la introducción de nuevos productos específicamente ecológicos.
		Schuh (2007) [268]	Comprender los factores que impulsan la complejidad en sistemas de manufactura
		Seuring, S. et al. (2004) [104]	Minimización del número de cambios de derivados al iniciar la producción.
		Lin et al. (2000) [269]	Reducción de cantidad de recursos utilizados en un proceso de producción.
	Dinámica	Clark and Jacques (2012) [270]	La complejidad absoluta de un sistema a partir de su configuración y estructura.
		Donk and Dam (1996) [271]	Evaluación de la complejidad a partir de las capacidades de los recursos y el flujo de materiales.
	Mixta	Giachetti et al. (2003) [272]	Complejidad estructural y operacional considerando características principales del sistema.
Matemático	Estática	ElMaraghy, H et al. (2014) [247]	Evaluar la complejidad estructural de un sistema de manufactura de fabricación en el ámbito físico.
		Modrak, V. et al. (2014) [219]	Complejidad basada en la configuración y variaciones de los productos.
		Cho et al. (2009) [273]	Complejidad estática según la eficiencia operacional de las máquinas.
		Hu et al. (2008) [133]	Medir el rendimiento a partir de la configuración del sistema en procesos de ensamble.
		Arteta and Giachetti (2004) [274]	Medir la complejidad considerando cambios estructurales en el proceso.
		Deshmukh et al. (1998) [4].	Relacionan cuantitativamente la complejidad estática y desempeño de los indicadores del sistema.
		Guide et al. (1997) [275]	Evaluar el impacto de la configuración del producto en el rendimiento de un proceso productivo.
		Frizelle and Woodcock (1995) [99]	Evalúan las decisiones operaciones en el corto plazo con el fin de minimizar los procesos.
	Dinámica	Fan et al. (2017) [276]	Cuantifican la complejidad de un sistema desde el factor humano respecto al tiempo de operación.
		Garbie and Shikdar (2011) [28]	Evaluación de la complejidad basada en un enfoque de lógica difusa.
		Huatuco et al. (2009) [68]	Equilibrio de producción en un entorno complejo con consideraciones de capacidad
		Lee et al. (2006) [277]	Análisis del sistema de manufactura en búsqueda de cumplir con las relaciones de precedencia.
		Sivadasan et al. (2002) [112]	Evaluación de etapas críticas del proceso productivo con consideraciones de complejidad dinámica
	Mixta	Isik (2010) [97]	Mediciones de la complejidad de tipo estructural y operativa en un sistema de manufactura.
		Wu et al. (2007) [24]	Análisis comparativo entre los costos operacionales y la complejidad del sistema.
		ElMaraghy et al. (2005) [245]	Medición de la complejidad por medio de codificación de los procesos.
		Efstathiou et al. (2002) [130]	Evaluación de la complejidad en sistemas de manufactura a través de la experiencia.

Figura 9. Comparación entre los diferentes tipos de modelos

2.13 Conclusiones del capítulo

El medio empresarial y manufacturero es cada vez más complejo y competitivo donde las organizaciones deben responder a diferentes condiciones de mercado reconfigurando sus procesos, productos y servicios. Estos se caracterizan por presentar elementos asociados con la variabilidad e incertidumbre, convirtiéndolos en sistemas difíciles y complejos. Por tanto la gestión de la complejidad es una acción necesaria, ya que permite un impacto positivo en los indicadores de desempeño y en la satisfacción del cliente.

En este capítulo se ha abordado todo lo referente a la complejidad en los sistemas de manufactura, realizado una revisión bibliográfica sistemática, de la conceptualización, tipificación, fuentes de complejidad, lo relacionado con la medición que abarca distintos enfoques y métodos y por último los modelos que se pueden utilizar para su estudio y análisis. El proceso de revisión se llevó a cabo con rigor, seleccionando y evaluando críticamente las investigaciones predominantes en los últimos años. En síntesis, la revisión mostró que la teoría de la complejidad está inmersa en los sistemas de manufactura, debido a la alta variedad, diversidad e incertidumbre en cada uno de sus componentes y etapas. En la literatura se distinguen diferentes enfoques, métodos, elementos y modelos para medir la complejidad, siendo los más comunes la dinámica no lineal (DN), la teoría de la información (TI), los métodos híbridos (H), el índice cuantitativo (IC) y otros enfoques (OA). Se demostraron de forma esquemática las características de cada uno de los enfoques, abriendo un espectro para futuros retos. En particular, los resultados muestran (i) Un creciente interés de la comunidad científica por las cuestiones relacionadas con los enfoques, métodos y tipos de modelos para medir la complejidad en un entorno de fabricación. (ii) Recomendaciones de los investigadores en los últimos años hacia los elementos estructurales del sistema y la incertidumbre. (iii) Brechas o poco desarrollo hacia elementos clave para la medición como las personas (Pe), los productos (Pd), la planificación y la programación (Ps). (iv) Tendencia positiva hacia los métodos de Exponentes de Lyapunov (LE), Kolmogorov (K), Entropía de Shannon (SE) y Cuestionarios (Q). (v) Alto predominio de los modelos hacia la complejidad estática y escaso desarrollo hacia la

complejidad dinámica y mixta. (vi) Mayor inclinación hacia los modelos matemáticos, ligados a técnicas de optimización, algoritmos y simulación de procesos, (vii) Utilización de indicadores de rendimiento, además de la complejidad, para la medición y evaluación de los sistemas de fabricación y (viii) un alto grado de escasez de estudios de complejidad en países latinoamericanos como Colombia, Argentina, Chile, Ecuador y entre otros.

Capítulo 3

Efectos y factores de complejidad en sistemas de manufactura

3.1 Objetivo

- (OE2)- Identificar por medio de un estudio los efectos y factores que generan complejidad en el proceso de manufactura de diferentes subsectores económicos, que permitan la identificación de técnicas, métodos e indicadores para una propuesta de solución.

3.2 Introducción

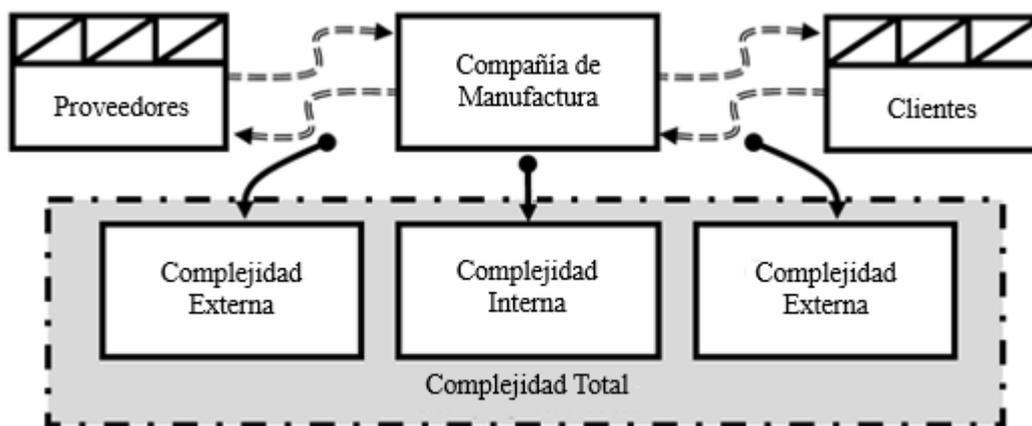
Actualmente las empresas deben adaptarse a continuos cambios y ser competitivas para poder mantenerse en el mercado. Como estrategia buscan, aumentar su productividad, mejorar los procesos, el desempeño e incrementar la satisfacción de los clientes. Sin embargo existen factores de complejidad que influyen y que están ligada con la alta cantidad de variables e incertidumbre. De acuerdo con [15], la complejidad se deriva de las propiedades estructurales del sistema siendo determinado por la variedad de elementos que lo integran y las relaciones que intervienen. Cabe resaltar que en un sistema de manufactura actúan factores de producción asociados, (i) con los materiales cuando no cumplen especificaciones de tiempo, cantidad y calidad, (ii) con la mano de obra cuando se presentan cambios de ritmo de trabajo, ausentismo y accidentes, (iii) con las maquinas cuando fallan, ausencia de repuestos y herramientas. Donde las variables de cantidad y variedad de los procesos, productos y servicios hacen que los sistemas sean inestables y complejos.

Como consecuencia de esta problemática aparecen los desajustes en los planes y las reprogramaciones, lo que aumentan los costos relegados en el consumo de horas de alistamiento de las máquinas, tiempos de reparación, horas extras, entre otras. Comprender la existencia de estas características permite considerar que las empresas manufactureras son sistemas complejos en entornos complejos y que la administración o gestión se vuelve compleja. A menudo los estudios que se han venido desarrollando son cada vez más frecuentes por el afán de las organizaciones, de encontrar una minimización de costos, aumento de los ingresos y mejora de la competitividad en mercados locales e internacionales [17-20]. Mediante un análisis previo en una revisión de la literatura se pudo inferir que existe una debilidad o escasez de dicha gestión en el sistema manufacturero. Dada esta situación se puede resaltar, en un ámbito mundial, países como Alemania considerado pionero en la gestión de técnicas de análisis de efectos de la complejidad en sistemas de manufactura, desarrollado por la Universidad de Bayreuth [107][278]. Consecuente a esto [279] en Suecia realizaron un estudio comparativo tomando como muestra tres compañías del sector. De igual forma en México tomando en cuenta los estudios previos mencionados, realizaron un análisis de los factores que generan complejidad en empresas del sector de manufactura más específicamente en el área de metalmecánica [145].

3.3 La complejidad en sistemas de manufactura

La complejidad de un sistema de manufactura se encuentra relacionado a diversas variables como origen, cantidad, variedad, tiempo y las relaciones del sistema. En cuanto al origen, para [97] las razones que causan la complejidad pueden originarse desde dentro o fuera de la empresa y puede clasificarse de manera general en tres categorías principales: interna, externa y total. La complejidad interna, se asocia con los flujos dentro del fabricante, y puede estar causada por factores externos a la organización denominada complejidad externa, la cual se asocia con flujos hacia los proveedores o clientes. Y la complejidad total, cubre toda la complejidad interna y externa (ver figura 10).

Figura 10. Complejidad de acuerdo al origen



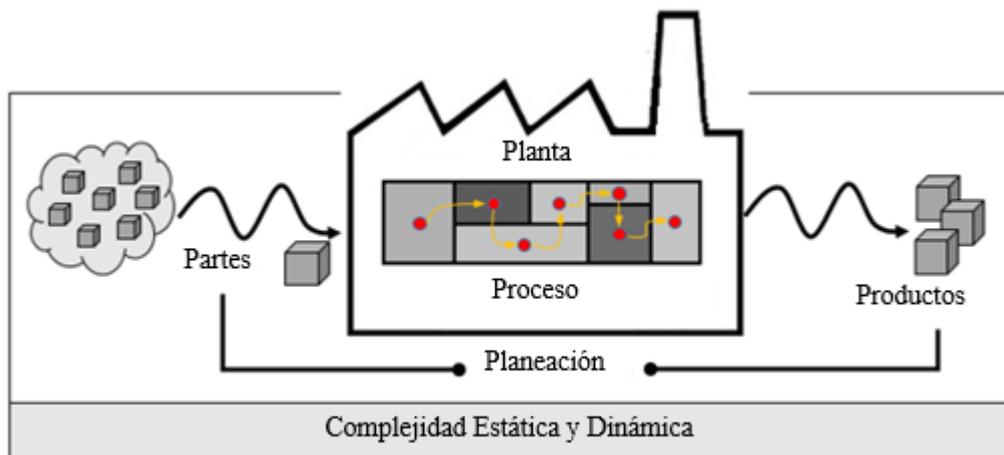
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el tiempo y su comportamiento, según [3] la complejidad en los sistemas de manufactura puede ser estática o dinámica. La complejidad estática se refiere a una característica asociable a los sistemas, y también a los procesos de producción, alineados con la estructura de las instalaciones o a la estructura de la planta y considera el grado de dificultad para su gestión y control. Tal tipo de complejidad se vuelve importante cuando se estudia el posible diseño de una instalación o planta. Y la complejidad dinámica se refiere al análisis de los sistemas a lo largo del tiempo, estudia la tendencia de los estados reales en un horizonte de tiempo dado (ver figura 11).

En los sistemas de manufactura se hace necesario gestionar la complejidad del proceso, para eso se deben identificar los factores relevantes que inciden en los indicadores de desempeño. De acuerdo con [14] existen factores determinantes en la complejidad de la fabricación como: (i) la estructura del producto, es decir, el número de artículos diferentes y para cada producto: número y tipo de subconjuntos, tiempos de ciclo, tamaños de lote, tipo y secuencia de recursos requeridos para producirlo; (ii) la estructura de la planta, es decir, la cantidad y los tipos de recursos, diseño, tiempos de configuración, tareas de mantenimiento, tiempo de inactividad, medidas de rendimiento; (iii) las funciones de planificación y programación, con tres componentes como las estrategias de planificación y programación, el número, contenido, tiempo y prioridad de los documentos utilizados para la planificación y programación y el proceso de toma de decisiones; (iv) el flujo de

información durante el proceso de toma de decisiones, trabajo en equipo, dentro de la planta con otros departamentos y externo con otras plantas, proveedores y clientes; (v) el dinamismo, la variabilidad y la incertidumbre del entorno como cambios del cliente, averías, ausentismo, inexactitud de datos y falta de fiabilidad, (vi) otras funciones dentro de la organización como capacitación, información política, etc.

Figura 11. Complejidad de acuerdo al tiempo y su comportamiento



Fuente: Elaboración propia

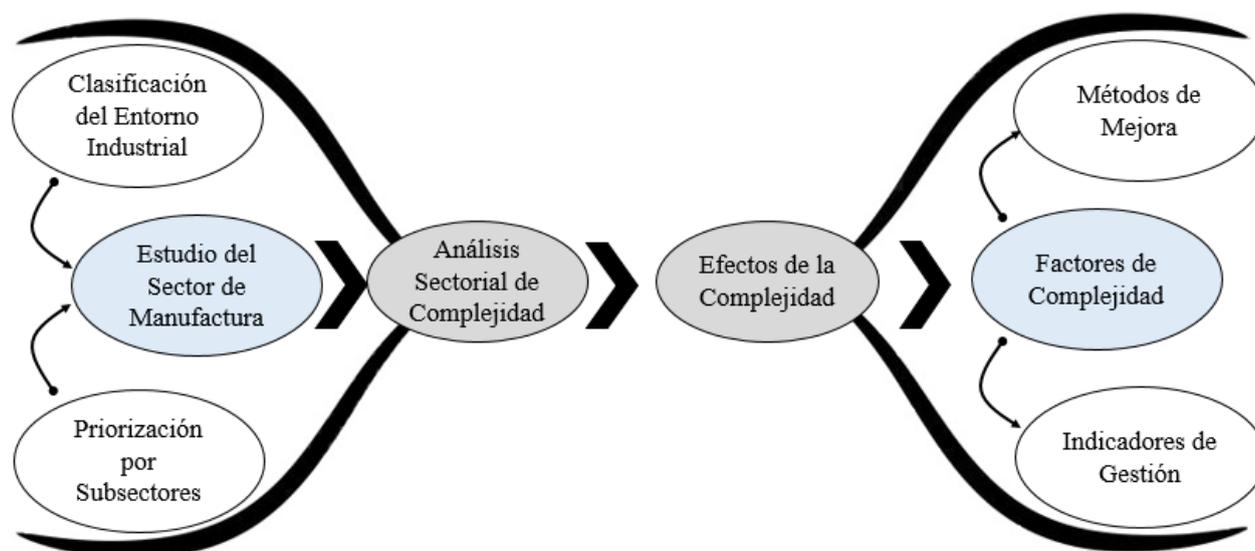
En cuanto a la complejidad estática se ha estudiado que tiene un efecto negativo sobre la productividad y la calidad [23], dado que un elevado número de productos y/o la variedad de sus componentes genera dificultades en el diseño y operación de las líneas de montaje [133]. Así mismo, la complejidad estática relacionada con el producto tiene un impacto negativo sobre los costos de producción [280]. Por otro lado, la complejidad dinámica también tienen un efecto negativo sobre los costos, por lo que a mayor complejidad dinámica, hay mayores costos [142].

Los expertos afirman que existen tres estrategias principales para combatir los efectos negativos de la complejidad: evitarla, reducirla o controlarla. Estudios de [281] afirman que el 25% de los costos totales de las compañías manufactureras se deben a la complejidad relacionada con el producto y el proceso. En síntesis las compañías tienden a usar estrategias para evitar, reducir o controlar la complejidad. De acuerdo con [27], el uso de herramientas y tecnologías para apoyar la gestión de la complejidad es ampliamente utilizado y reconocido.

3.4 Metodología

Para el estudio de efectos y factores de complejidad en sistema de manufactura, se hizo necesario un análisis de distintos subsectores económicos, considerando características de estructura, variedad y relaciones, que permitieran previamente una priorización a partir de su clasificación. Los resultados sirven de apoyo a los gerentes y administradores en el proceso de toma de decisiones, por lo que muestran un enfoque para gestionar la complejidad de los procesos de manufactura identificando los efectos y factores relevantes que inciden en los indicadores de desempeño.

Figura 12. Metodología propuesta para el estudio de efectos y factores de complejidad



Fuente: Elaboración propia

Inicialmente se desarrolla (i) Un estudio del sector de manufactura en la ciudad de Cartagena – Colombia. En esta fase se hace un análisis general de las pequeñas y medianas empresas (Pyme) en la industria manufacturera, teniendo en cuenta su clasificación de acuerdo a la diferente actividad económica, número de empresas que las conforman y sus activos totales. (ii) Se aplica la metodología de análisis de la complejidad a los subsectores priorizados mediante cuestionarios y análisis de datos de las empresas. (iii) Se analizan los efectos que se generan en el sector, a partir de los elementos que intervienen en un sistema como planta, proceso, producto y planificación. (iv) Se identifican los factores teniendo en cuenta su clasificación según el tipo y origen, (v) luego se determinan los métodos de mejora y (vi) los indicadores de desempeño para poder gestionar la complejidad que incide en la variabilidad del sistema, en esta última parte se toma de apoyo la metodología empleada por [107][278] (ver figura 12). Cabe resaltar que para elaborar una metodología de cuantificación de los factores determinantes de la complejidad y los efectos, en primer lugar se identifican los factores de la complejidad teóricamente posibles y luego los que sean pertinentes en la práctica [107].

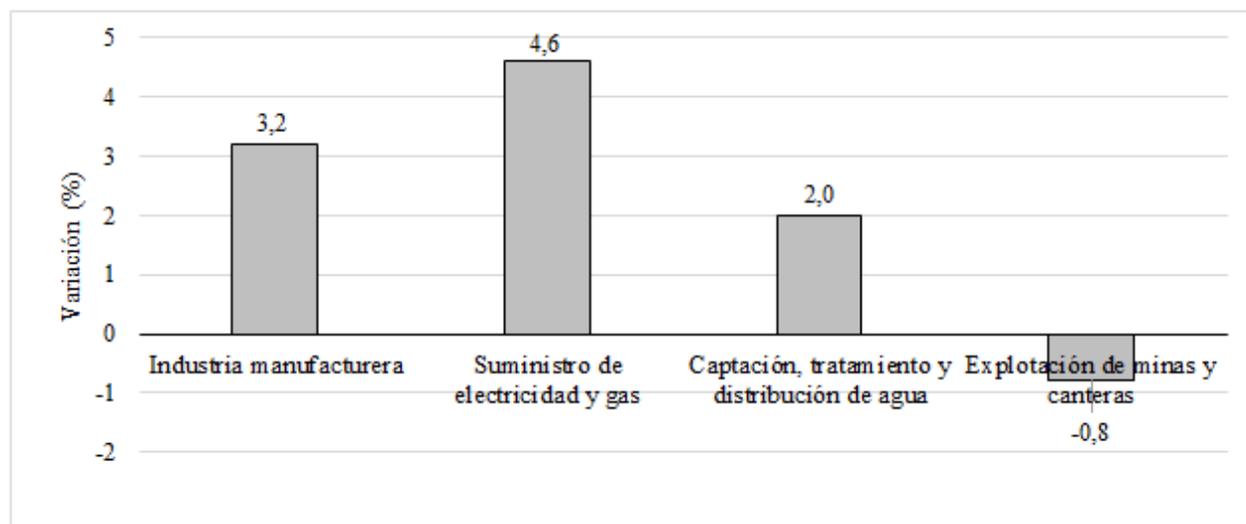
3.4.1 Estudio del sector manufacturero

El sector industrial a nivel internacional se clasifica entre grande, mediana y pequeña industria. En América Latina una proporción amplia se encuentra representado como Pequeña y Mediana Empresa (Pyme) [8][9]. Las principales economías de Latinoamérica para el año de 2019 evidenciaron avances menores respecto al año anterior, sin embargo cabe resaltar el crecimiento productivo encabezado por Colombia con un 2.20%, siendo jalonado por actividades como: fabricación de muebles, elaboración de productos de tabaco; elaboración de bebidas; elaboración de productos alimenticios, fabricación de productos de madera, fabricación de productos de refinación de petróleo y fabricación de productos metalúrgicos. En segunda instancia se encuentra Chile, con una cifra de 2.13% luego Perú con 1.58%. México que sólo avanzó 1.27%, Brasil, con

0.79% y Argentina que ejecuta un programa anti-inflacionario que retrocedió 5.71%¹.

A nivel nacional, en diciembre 2019 frente a diciembre 2018, tres de los cuatro sectores industriales presentaron variaciones positivas. Industria manufacturera presentó una variación de 3,2%; Suministro de electricidad y gas de 4,6% y Captación, tratamiento y distribución de agua de 2,0%. En contraste, el sector de Explotación de minas y canteras presentó una variación de -0,8 %² (ver figura 13).

Figura 13. Variación del índice de producción industrial por sectores industriales a 2019



Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos DANE

Respecto a la industria manufacturera colombiana, esta se encuentra ubicada en su mayoría en áreas metropolitanas con el 73% de la industria en Bogotá D.C, Medellín y Cali, y el 15% se concentraron en ciudades como Barranquilla, Bucaramanga, Pereira, Manizales, Cúcuta y Cartagena³. De acuerdo con la Ley MiPyme No. 905 del 2 de agosto de 2004, las empresas se clasifican según la planta de personal ocupada y los activos totales expresados en salarios mínimos mensuales legales vigentes (ver tabla 14).

Tabla 14. Clasificación de las empresas en Colombia

Clasificación	Activos totales	Planta de personal
Microempresa	Menos de 501 salarios mínimos legales mensuales vigentes	Hasta 10 trabajadores
Pequeña	Entre 501 y 5000 salarios mínimos legales mensuales vigentes	Entre 11 y 50 trabajadores
Mediana	Entre 5001 y 30000 salarios mínimos legales mensuales vigentes	Entre 51 y 200 trabajadores
Grande	Superior a 30000 salarios mínimos legales mensuales vigentes	Más de 200 trabajadores

¹ Tomado de Indicadores de seguimiento de economía por países (ISE; IMACEC; IMPN; IGAE; IBC; EMAE), fuente bancos centrales e institutos de estadísticas.

² Tomado de la página web: <https://www.valoraanaltik.com/2020/02/13/indice-de-produccion-industrial-crecio-23-en-diciembre-de-2019-en-colombia/>

³ Tomado de la página web: <https://www.dane.gov.co/>

Según de base de datos de la cámara comercio de Cartagena actualmente existe una cifra de 32.535 empresas distribuido de la siguiente manera: 29.576 (91%) microempresas, 2.792 (8,6%) Pymes y grandes empresas 167 (0,5%). Seleccionando la industria manufacturera, este se encuentra representado por un total 3982 empresas equivalente a un 12%, hasta finales del año 2019, la cantidad de microempresas eran de 3.669, Pymes de 278 dividido en 224 como pequeñas y 54 medianas y en el caso de las grandes empresas una cifra de 35. En término de porcentajes el 92% equivale a microempresas, el 7% a Pymes y el 1% a las grandes industrias (ver tabla 15).

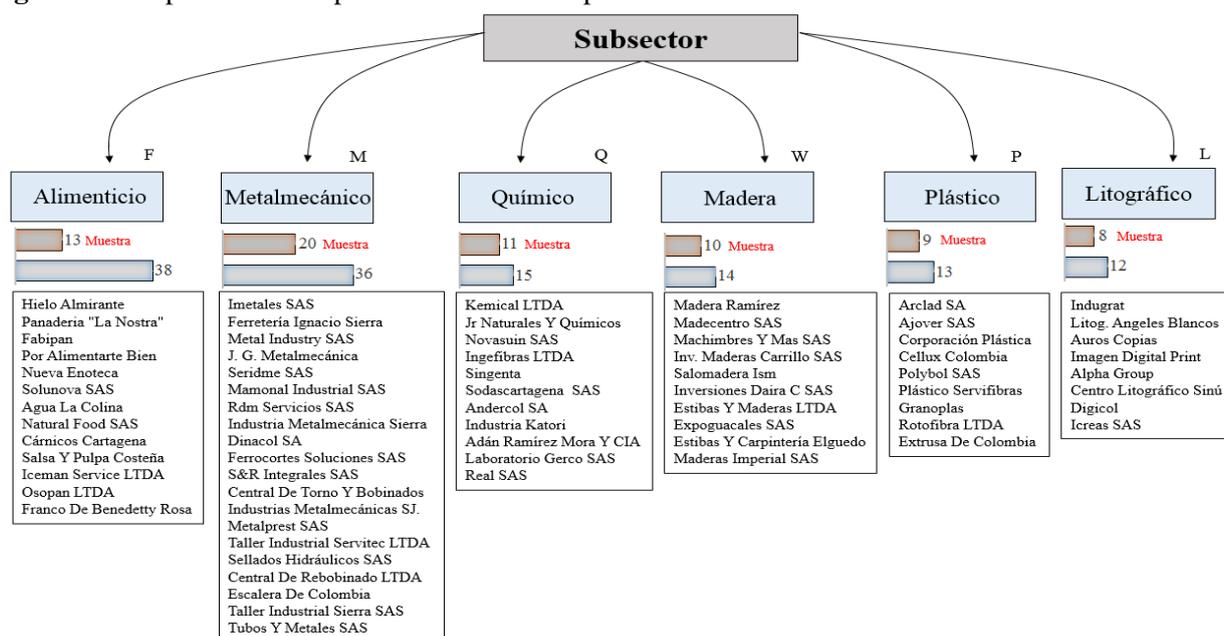
Tabla 15. Participación de empresas manufactureras en la ciudad de Cartagena

Tamaño	Total Empresas	Participación en el Total	Sector Manufactura	Participación en el Sector
Microempresa	29576	90,9%	3669	92,1%
Pequeña y Mediana	2792	8,6%	278	7,0%
Grande	167	0,5%	35	0,9%
Total	32535	100%	3982	100%

Fuente: Elaboración propia

La ciudad de Cartagena cuenta actualmente con 21 subsectores que participan de la Industria Manufacturera, en donde las Pymes se concentran en todos estos subsectores, según Clasificación Internacional Industrial Uniforme (CIIU) de la Cámara de Comercio de Cartagena. Teniendo en cuenta la cantidad de Pymes pertenecientes a cada subsector es evidente que los subsectores más representativos en un 70% acumulado están representados por: (i) Elaboración de productos alimenticios (CIIU-10) con 38 empresas. (ii) Fabricación de productos elaborados de metal (CIIU-25) con 36 empresas. (iii) Fabricación de sustancias y productos químicos (CIIU-20) con 15 empresas. (iv) Transformación de la madera y fabricación de productos de madera y de corcho (CIIU-16) con 14 empresas. (v) Fabricación de productos de caucho y de plástico (CIIU-22) con 13 empresas y (vi) Actividades de impresión y de producción de copias a partir de grabaciones originales (CIIU-18) con 12 empresas.

Figura 14. Proporción de empresas seleccionadas por subsector



3.4.2 Análisis sectorial de la complejidad

En primera instancia se identificaron las empresas de cada subsector económico (población) y se escogieron aquellas que representan un 70% de participación acumulada, el cual se toma como criterio de muestra para poder desarrollar la metodología. De un total de 128 empresas se seleccionaron 71 representando un 55,5% del tamaño total. En la figura 14 se puede evidenciar cantidad y nombres de las empresas seleccionadas por subsector. Dado lo anterior, teniendo en cuenta que en esta investigación el análisis es de tipo sectorial. La obtención de la información se generó mediante visitas de campo y la aplicación de encuesta estructurada, dirigidas directivos de producción y gerentes, ajustada a características como: (i) Tipo de operación, (ii) Número de empleados en producción, (iii) Cantidad de referencias de productos, (iv) Cantidad de clientes, (v) Número de estaciones de trabajo y (vi) Tipo de proceso (ver figura 15)

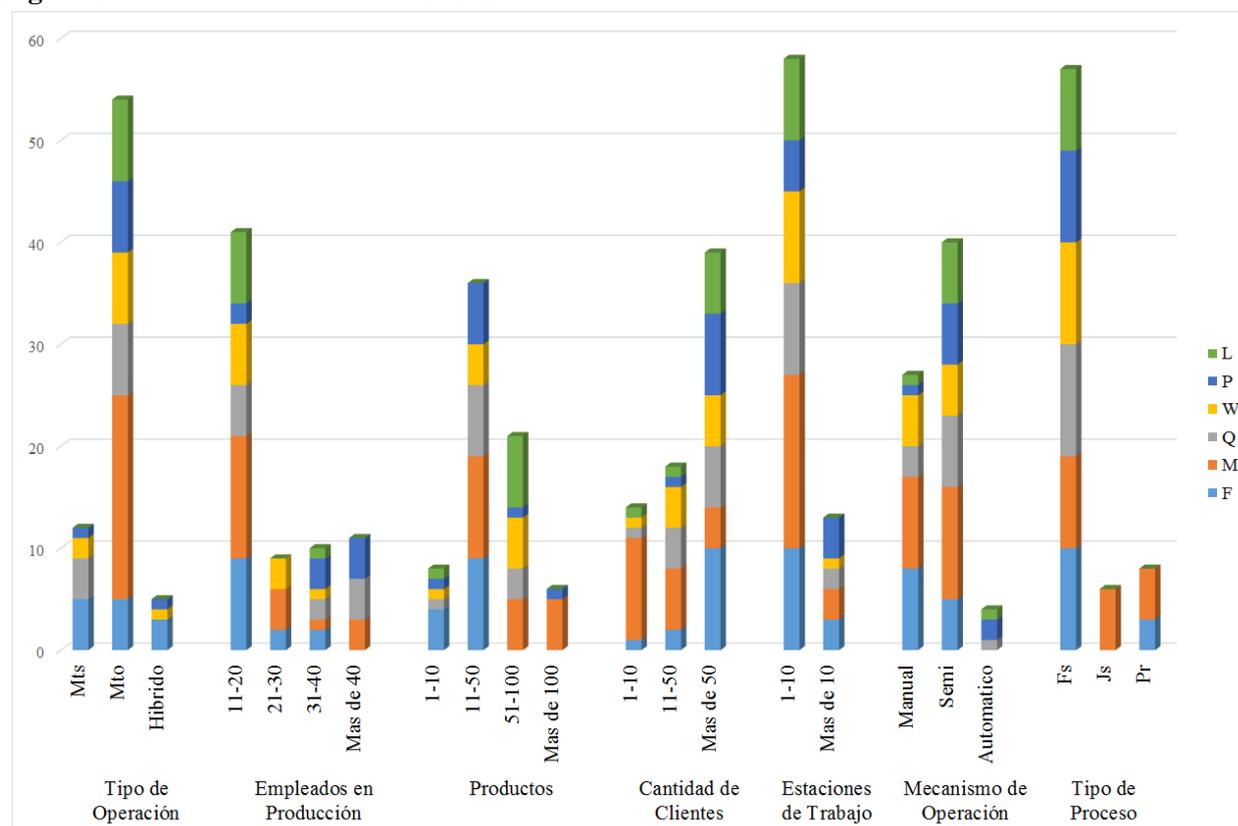
Figura 15. Formato de encuesta para estudio sectorial

FORMATO DE ENCUESTA DE INFORMACIÓN SECTORIAL EN SISTEMAS DE MANUFACTURA										
Empresa:			Tipo de Operación				Fabrican para almacenar		Fabrican bajo pedido	
Años en Operación		Número Empleados en Producción			1-10	11-20	21-30	31-40	+ de 40	
Tipos de Productos Terminados Mes		1-10	11-50	51-100	+ de 100	Cantidad de Clientes Mes	1-10	11-50	+ de 50	
Operación de Tipo		Automatico	Semi Automatiza	Manual	Tamaño de Lotes de Productos Terminados			Iguales	Distintos	
Numero Estaciones de Trabajo		1-10	+ de 10			Existe una Gestión de Pronósticos de Ventas			Si	No
Existe un Programa Computacional Para la Planificación y Control de la Producción					Si	En los Productos Existe Alta Cantidad de Partes			Si	
					No				No	
Maquinas Agrupan de Acuerdo al Proceso que Realizan				Si	No	La Producción es por Proyecto		Si	No	
La Fabricación es una Línea Continua de Producción				Si	No	Es de tipo híbrido		Si	No	

Fuente: Elaboración propia

Los resultados encontrados, evidencia que el 28,2% de los subsectores están representados por el subsector (M), seguidos por las empresas (F) con el 18,3%, luego las empresas que fabrican (C) con el 15,5%, y finalmente las empresas dedicadas a la transformación de (W), fabricación de (P) y empresas (L), con el 14,1%, 12,7% y 11,3%, respectivamente.

En otros resultados se tiene que el 61% de las empresas trabajan bajo un tipo de operación por pedido (MTO), el 58% presentan una cantidad entre 11 y 50 empleados en el área de producción. El 51% de las empresas maneja entre 11 a 50 referencias de distintos productos. El 55% tiene más de 50 clientes. El 82% coinciden en que tienen entre 1 a 10 estaciones de trabajo para el desarrollo de proceso productivo, un 56% de las empresas tiene un mecanismo de operación semiautomático y en cuanto al tipo de proceso, la fabricación de tipo continua o por producto (FS) representa el 80,3%, la fabricación por proceso (JS) el 8,5% y por proyecto (PR) el 11,3% (ver figura 16).

Figura 16. Resultados tabulados del análisis del sector

Fuente: Elaboración propia

Para un análisis profundo de sectorial de la complejidad se toma como base la metodología de análisis de la complejidad desarrollada por la Universidad de Bayreuth, enmarcada en un proyecto de investigación financiado por el Ministerio Federal de Economía y Tecnología de Alemania, que consiste en determinar los efectos de la complejidad en los procesos de producción a fin de convertirlos posteriormente en un modelo. La configuración ayuda a gestionar la complejidad en empresas de manufactura⁴. De acuerdo con la metodología, en la etapa 1 se obtiene la información sobre la empresa, a partir de un cuestionario estructurado (ver figura 17), luego se continúa con la etapa 2 donde se enumeran los efectos y factores de complejidad, consecuente a esto en la etapa 3 se muestra el conjunto de métodos adecuados para controlar los efectos de la complejidad y por último en la etapa 4 se relacionan los conductores de complejidad "Drivers" e indicadores clave de rendimiento ("KPI").

Como parte de la metodología descrita enmarcada el proyecto desarrollado por la Universidad de Bayreuth, se aplicaron una serie de herramientas diagnósticas, como entrevistas y encuestas a una alta población del sector industrial, donde con la ayuda de expertos se lograron identificar los efectos que se atribuyen a una mayor complejidad, proporcionado así un total de 50 efectos diferentes. De igual forma se cuantificó, examinó y evaluó, mediante matrices más de 4.800 combinaciones de cada factor de complejidad, cada campo objetivo y cada dimensión. De esta

⁴ Tomado de la página web: <http://www.recore.org>

manera, cada uno de los 50 efectos se compara con 44 métodos e instrumentos, lo que da como resultado una cantidad de 2.200 combinaciones documentadas en una matriz bidimensional. Los resultados se utilizan para desarrollar finalmente una herramienta de configuración basada en la web que permite a las empresas de fabricación puedan indagar sobre qué métodos o herramientas de optimización adaptados a los indicadores de su empresa son adecuados para gestionar los efectos de complejidad en su proceso de manufactura.

Figura 17. Formato de estudio de complejidad sectorial en sistemas de manufactura

FORMATO DE ESTUDIO DE COMPLEJIDAD SECTORIAL EN SISTEMAS DE MANUFACTURA				
Producto			Proceso	
1. Existe alta variedad de productos	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	1. Existen muchas instrucciones de trabajo	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
2. Existe un gran esfuerzo para identificar los productos	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	2. Existen pérdida de tiempo e ineficiencias del proceso	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3. La fabricación es en grandes cantidades	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	3. El proceso está estandarizado	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
4. La trazabilidad del producto es dificultosa	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	4. Existen altos niveles de inventario de intermedios	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
5. Aumento frecuente de los requisitos del cliente	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	5. Existe un gran esfuerzo para el mantenimiento de las maquinas	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
Planta			Personas	
1. Existen muchas estaciones de trabajo	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	1. Se necesita personal altamente calificado	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
2. Existen altos requisitos de espacio	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	2. Las habilidades son necesarias en el proceso	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3. La planta está bien diseñada con respecto a lo flujos	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	3. Es necesario el conocimiento y la experiencia	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
4. Existen cuellos de botella de capacidad	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	4. Existe un gran esfuerzo por entrenamiento	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
5. Existen cambios frecuentes en las instalaciones	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	5. Existen perdidas de tiempo por disponibilidad de mano de obra	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
Planificación			Metodos Aplicados	
1. Dificultades para planificar las fechas de entrega	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	Planificación de recursos empresariales (Erp)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
2. La secuencia de la producción no es predecible con precisión	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	Planificación de requerimiento materiales (Mrp)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3. Existen pedidos urgentes frecuentes no planificados	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	Reducción de tiempo de alistamiento (Smed)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
4. Existe mayor inventario de productos terminados	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	Sistemas de tarjetas (Kanban)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
5. Existe un bajo uso de estaciones de trabajo y maquinaria	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	Mantenimiento productivo total (Tpm)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
Firma y Sello de la Empresa			Mapa de flujo de valor (Vsm)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
			Cinco eses (5's)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
			Justo a tiempo(Jit)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
			Teoría de restricciones (Toc)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
			Mejora continua (Kaisen)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
			Control estadístico de procesos (Spc)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Identificación de los efectos de la complejidad

Para identificar los efectos de la complejidad se desarrolló un estudio en cada una de las empresas (71 empresas en total) por subsectores, mediante una técnica de entrevista y encuestas al personal calificado y experimentado, considerando aspectos relevantes en los cinco elementos que componen un sistema de producción (i) Planta, (ii) Proceso, (iii) Productos, (iv) Personas y (v) Planificación. Dado lo anterior se seleccionaron (14) efectos con mayor ocurrencia en los distintos sectores que representa el 70% acumulado (ver tabla 16). La aplicación del instrumento tomo como base los criterios de la metodología descrita anteriormente. Y propone una lista de verificación compuesta por cincuenta (50) efectos. A continuación en la tabla 17 se muestran la identificación de los efectos seleccionados, los cuales brindaran la información relevante para las siguientes etapas.

Tabla 16. Efectos relevantes en los distintos sectores económicos

Elemento	Preguntas	No	Si	Porcentaje		Acumulado
Personas	Las habilidades son necesarias en el proceso	0	71	100,0%	6,4%	6,4%
Personas	Es necesario el conocimiento y la experiencia	5	66	93,0%	5,9%	12,3%
Productos	La trazabilidad del producto es dificultosa	9	62	87,3%	5,6%	17,9%
Productos	Existe un gran esfuerzo para identificar productos	10	61	85,9%	5,5%	23,4%
Planificación	La secuencia de la producción no es predecible	12	59	83,1%	5,3%	28,7%
Planificación	Existe mayor inventario de productos terminados	13	58	81,7%	5,2%	34,0%
Procesos	Existen altos niveles de inventario de intermedios	16	55	77,5%	5,0%	38,9%
Planificación	Existen pedidos frecuentes no planificados	17	54	76,1%	4,9%	43,8%
Personas	Se necesita personal altamente calificado	19	52	73,2%	4,7%	48,5%
Personas	Existe un gran esfuerzo por entrenamiento	26	45	63,4%	4,1%	52,5%
Planta	Existen cuellos de botella de capacidad	27	44	62,0%	4,0%	56,5%
Productos	Aumento frecuente de los requisitos del cliente	29	42	59,2%	3,8%	60,3%
Procesos	Existe un gran esfuerzo para el mantenimiento	30	41	57,7%	3,7%	64,0%
Planta	Existen altos requisitos de espacio	30	41	57,7%	3,7%	67,7%
Procesos	Existen muchas instrucciones de trabajo	32	39	54,9%	3,5%	71,2%
Productos	La fabricación es en grandes cantidades	35	36	50,7%	3,2%	74,4%
Productos	Existe alta variedad de productos	38	33	46,5%	3,0%	77,4%
Planta	Existen muchas estaciones de trabajo	45	26	36,6%	2,3%	79,7%
Planificación	Existe un bajo uso de estaciones de trabajo	21	50	29,6%	4,5%	84,2%
Procesos	Existen pérdida de tiempo en el proceso	50	21	29,6%	1,9%	86,1%
Personas	Existen pérdidas de tiempo por e mano de obra	52	19	26,8%	1,7%	87,8%
Procesos	El proceso está estandarizado	16	55	22,5%	5,0%	92,8%
Planta	La planta está bien diseñada respecto a los flujos	14	57	19,7%	5,1%	97,9%
Planificación	Dificultades para planificar las fechas de entrega	59	12	16,9%	1,1%	99,0%
Planta	Existen cambios frecuentes en las instalaciones	60	11	15,5%	1,0%	100,0%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Efectos de la complejidad seleccionados

Se necesitan amplias cualificaciones	Cuellos de botella en la capacidad	Necesarios cambios organizacionales	Gestión de los conocimientos	Daños debido al almacenamiento
Diferentes flujos de materiales	Manipulación diferenciada	Difícil trazabilidad	Dificultades en la planificación	Infraestructura elaborada
Es necesario la experiencia	Frecuentes pedidos urgentes	Gran esfuerzo en el mantenimiento	Gran esfuerzo de identificación	Gran esfuerzo de coordinación
Alta frecuencia de transporte	Alto nivel de stock intermedio	Elevadas necesidades de espacio	Alto tiempo de almacenamiento	Mayor inventario
Mayores plazos de entrega	Mayor stock de productos terminados	Stock de productos no almacenados	Aumento de las necesidades de los clientes	Mayor esfuerzo de asignación
Mayor esfuerzo de adquisición de datos	Mayor cualificación de los empleados	Mayor esfuerzo en la comunicación	Aumento de la tasa de error	Aumento de la manipulación
Gastos de mantenimiento	Aumento de los gastos de personal	Mayor esfuerzo de búsqueda	Barreras lingüísticas	Rutas largas
Bajo nivel de automatización	Baja utilización de los puestos de trabajo	Muchas opciones	Muchas instrucciones de trabajo	Indiferencia almacenamiento
No hay estandarización	Sobrecapacidades	Impredecible la secuencia producción	Pedidos más pequeños	Pérdidas de tiempo en el proceso
Cálculo incierto	Varios barriles de almacenamiento	Diversas técnicas de almacenamiento	Varios tipos de almacenamiento	Varios tamaños de pedidos

Teniendo en cuenta las tabulaciones de los resultados, se muestra claramente los efectos más representativos en cada uno de los subsectores y los elementos con mayor impacto en el sector manufacturero, destacando el elemento personas con un 86,6%, seguido del producto con un 83,2%, lo que significa que un incremento en la complejidad genera mayores efectos en estos elementos, luego el proceso y la planificación con un 70,3% y finalmente la planta con un 67,9% (ver tabla 18).

Tabla 18. Efectos más representativos en cada uno de los subsectores y los elementos

Elemento	Efectos	A	M	Q	W	P	L	Total
Producto	Existe un gran esfuerzo para identificar los productos	0,77	0,90	1,00	0,80	1,00	0,75	0,832
	La trazabilidad del producto es dificultoso	0,77	0,90	1,00	0,80	1,00	0,75	
	Aumento frecuente de los requisitos del cliente		0,70	0,64		0,67	0,88	
Proceso	Existen altos niveles de inventario de intermedios					0,67		0,704
	Existe un gran esfuerzo para el mantenimiento		0,55		0,60	1,00		
Planta	Existen altos requisitos de espacio	0,62			0,60	0,67	0,63	0,679
	Existen cuellos de botella de capacidad		0,70		0,70	0,78	0,75	
Personas	Se necesita personal altamente calificado	0,69	0,85		0,70	0,78	0,75	0,866
	Las habilidades son necesarias en el proceso	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	Es necesario el conocimiento y la experiencia	0,77	1,00	1,00	0,80	0,89	1,00	
	Existe un gran esfuerzo por entrenamiento		0,70	0,73		0,78	0,75	
Planeación	La secuencia de la producción no es predecible					0,67		0,703
	Existen pedidos urgentes frecuentes no planificados	0,62	0,95	0,73	0,60	0,78	0,75	
	Existe mayor inventario de productos terminados			0,64	0,60			

Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Factores de generación de complejidad

Los factores de generación de complejidad de un sistema de manufactura pueden ser de tipo interno que son los generados por las decisiones y los elementos dentro de la organización como el proceso, el producto, la planeación, las personas y la planta. Y los factores de tipo externo ligados con las relaciones entre proveedores, clientes, mercado, competencia y regulaciones. Cabe resaltar que el instrumento aplicado determina los factores relevantes de generación de complejidad de acuerdo a cada uno de los efectos, por tanto algunos presentan duplicidad. En la tabla 19 se sitúa una relación agrupada e integral para todos los sectores económicos tomados en el estudio, teniendo en cuenta la clasificación de la complejidad desde su origen y tipo, cabe resaltar el alto número de factores que generan complejidad desde un ámbito interno en el sector de manufactura.

Tabla 19. Matriz de identificación de factores de complejidad

Complejidad	Estática	Dinámica
Interna	# Máquinas; # Materiales; # Puestos de trabajo; # Fases del proceso; # Piezas por producto; # Planes de trabajo; # Procesos de producción; # Sistemas de información; # Empleados; # Asignación de recursos; # Generaciones de productos; # Grupos de productos; # Modificaciones.	Volumen de producto; Experiencias de los empleados; Disponibilidad de los empleados; Espacio de producción; Capacidad; Tamaño de la empresa; Disponibilidad de información; Disponibilidad de máquinas; Cambio de técnica y procedimiento; Información sobre el producto.
Externa	# Clientes; # Proveedores.	Necesidades de los clientes; cambios en el mercado; cambios tecnológicos; mercado de ventas; volumen de mercado; mercado de compras; competencia.

3.4.5 Identificación de métodos de mejora

El instrumento propone una lista de verificación compuesta por cuarenta y cuatro (44) métodos o instrumentos de mejora. Mediante el uso de un configurador que genera métodos a partir de los efectos identificados, logrando evidenciar mecanismos que permiten contrarrestar, reducir y eliminar la complejidad en sistemas de manufactura. Se puede observar en la tabla 20, una cantidad de (36) métodos generados de un total de (44) que se hacen necesario sean implementadas en los diferentes subsectores como alimenticio, metalmecánico, químico, maderero, plástico y litográfico. Es evidente que estos subsectores compartan métodos comunes para abordar los problemas de complejidad y que su mayoría están ligados a la filosofía lean manufacturing y técnicas de modelamiento.

3.4.6 Indicadores de gestión de la complejidad

Además de identificar los factores de complejidad, es necesario medirla para relacionarla con los costos, y otros indicadores de desempeño con el propósito de establecer oportunidades de mejora [282]. La tabla 21 evidencia el resultado final que proporciona la oportunidad de establecer un sistema de gestión de la complejidad basado en indicadores claves que minimicen los efectos que se producen en el sector de manufactura de manera integral. Cabe resaltar que estos indicadores de gestión le permiten a los tomadores de decisiones poder controlar los efectos de la complejidad a partir de unos factores identificados en los subsectores del sector de manufactura.

Tabla 20. Identificación de métodos de mejora

Metodología 5S	Área de producción ágil	Ensamble por orden de trabajo	Aplicación de identificación automática	Identificación automática de núcleos
Mejores prácticas (Benchmarking)	Proceso de mejora continua (Kaizen)	Cadena de suministro orientada a la calidad	Gestión de las relaciones con los clientes (CRM)	Almacenamiento de núcleos desmontados
Integración de los empleados	Cuadro de equilibrio de conocimientos de los empleados	Formación de los empleados	Método First in First out (FIFO)	Producción en flujo
Trabajo en equipo	Heijunka (Nivelación)	Incentivos (sistema interno de sugerencias)	Jishu Hozen (Mantenimiento autónomo)	Justo a tiempo (JIT)
Metodología Kanban	Optimización del tamaño del lote	Métodos de medición del tiempo (MTM)	Grabación multifunción	Trabajo en múltiples máquinas
Registro de datos operativos	Optimización de los tiempos de preparación	Gestión del rendimiento	Poka Yoke	Planificación y control de la producción (PPC)
Producción en cadena	Segmentación de la producción	Separación de la producción y la logística	Shojinka - empleo flexible	Estandarización
Control estadístico de procesos (SPC)	Gestión de proveedores	Gestión de la cadena de suministro (SCM)	Producción basada en Takt	Teoría de las Restricciones (TOC)
Mantenimiento productivo total (TPM)	Control de calidad total (TQC)	Metodología del flujo de valor	Visualización	

3.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se tomó como base la metodología de análisis de la complejidad desarrollada por la Universidad de Bayreuth, con la diferencia que el instrumento se aplicó para un sector integral. El estudio se desarrolló en el sector de manufactura en la ciudad de Cartagena – Colombia, tomando como muestra las pequeñas y medianas empresas (Pyme) en la industria manufacturera. A partir de esto, se logró el objetivo de poder identificar los efectos más representativos en cada uno de los subsectores y los elementos con mayor impacto en sector manufacturero en materia de la complejidad. De igual forma, se identificaron los factores de generación de complejidad por origen y por tipo. Consecuente a esto el instrumento permitió evidenciar las distintas metodologías de manera integral que se hacen necesario sean implementadas en los diferentes subsectores, y por último se logra establecer un sistema de gestión de la complejidad basado en indicadores claves que minimicen los efectos que se producen en el sector de manufactura. Este capítulo de igual forma, permitió reducir la brecha entre la fundamentación teórica existente y los proyectos prácticos aplicados, dado que no habían sido considerados antes por las empresas del sector de manufactura. En síntesis, cabe destacar que (i) un cambio incremental en la complejidad genera un mayor efecto en elementos del sistema productivo como las personas y el producto, (ii) el alto volumen de factores que generan complejidad desde un ámbito interno, y (iii) los métodos comunes de mejora para abordar los problemas de complejidad y que es su mayoría están ligados a la filosofía lean manufacturing y técnicas de modelamiento.

Tabla 21. Relación y descripción de indicadores de gestión

Indicador	Descripción	Formulación
Índice de utilización de la superficie	El índice de utilización del área se determina dividiendo el espacio de las estanterías por el área total de almacenamiento. La unidad del KPI es el porcentaje. Debido a las elevadas necesidades de espacio, el índice de utilización de la superficie debe ser bastante alto para que la superficie disponible se utilice de forma óptima.	$(\text{Área de almacenamiento utilizada} / \text{Área de almacenamiento total}) * 100\%$
Nivel de rendimiento de la capacidad	El nivel de estandarización se determina dividiendo el rendimiento real por el rendimiento objetivo de la capacidad, respectivamente. La unidad del KPI es el porcentaje. Para alcanzar un buen resultado, la parte del nivel de rendimiento de la capacidad debe ser bastante alta.	$(\text{Rendimiento real} / \text{Capacidad respectivamente rendimiento objetivo}) * 100\%$
Adaptación de la capacidad inicial por empleado y año	La adaptación inicial de la capacidad por empleado y año se determina dividiendo la adaptación inicial de la capacidad por año entre el número de empleados. La unidad del KPI es una unidad de tiempo, por ejemplo, las horas. Para alcanzar un buen resultado, la adaptación inicial de habilidades por empleado y año debe ser bastante pequeña.	Adaptación de la capacidad inicial por año / Número de empleados
Registro multifunción	El registro multifuncional se determina dividiendo el número de observaciones n' por la suma de observaciones (N). La unidad del KPI es el %. Para alcanzar un buen resultado, el registro multifunción (p) debe ser bastante pequeño y sólo se deben considerar unos pocos escenarios para no falsificar el resultado.	$\{ \text{Número de observaciones (n')} / \Sigma[\text{Observaciones(N)}] \} * 100\%$
Parte de áreas de disposición	La parte de las áreas de eliminación se determina dividiendo las áreas de eliminación por el área total de producción. La unidad del KPI es el porcentaje. Para obtener un buen resultado, la parte de las áreas de eliminación debe ser bastante pequeña.	$(\text{Áreas de disposición} / \text{Área total de producción}) * 100\%$
Eficiencia del proceso	La eficiencia del proceso se determina dividiendo el trabajo de valor añadido por el trabajo total gastado. El trabajo también puede ser medido en una unidad de tiempo. La unidad del KPI es el porcentaje. Para alcanzar un buen resultado la eficiencia del proceso debe ser bastante alta.	$(\text{Trabajo de valor añadido} / \text{Trabajo total gastado}) * 100\%$
Tasa de pedidos urgentes (producción y compra)	La tasa de pedidos urgentes se determina dividiendo el número de pedidos urgentes por el número total de pedidos. La unidad del KPI es el porcentaje. Para obtener un buen resultado, la tasa de pedidos urgentes debe ser bastante pequeña.	$(\text{Número de pedidos urgentes} / \text{Número total de pedidos}) * 100\%$
Tasa de desechos	La tasa de rechazo se determina dividiendo la producción defectuosa por la producción total. La tasa de rechazo se determina dividiendo el rechazo por la producción total. La unidad de ambos KPI es el porcentaje. Para alcanzar un buen resultado la parte de la producción defectuosa debe ser bastante pequeña.	$(\text{Desecho} / \text{Total producción}) * 100\%$
Esfuerzos de formación por empleado y año	El esfuerzo de formación de los empleados se determina dividiendo los costes totales de la medida de formación de los empleados por el número total de empleados. La unidad del KPI es el euro/empleado. Para alcanzar un buen resultado, el esfuerzo de formación de los empleados debe ser bastante alto.	Costos totales de la medida de formación de los empleados / Número total de empleados

Capítulo 4

Análisis estadístico de la complejidad en sistema de manufactura

4.1 Objetivo

- (OE3)- Estudiar la relación existente entre las características y elementos de un sistema manufactura con respecto a la complejidad, de diferentes sectores económicos, que permitan la determinación del nivel de significancia entre subsectores, tipo de operación y tipo de proceso y a su vez un mayor entendimiento respecto a indicadores de desempeño.

4.2 Introducción

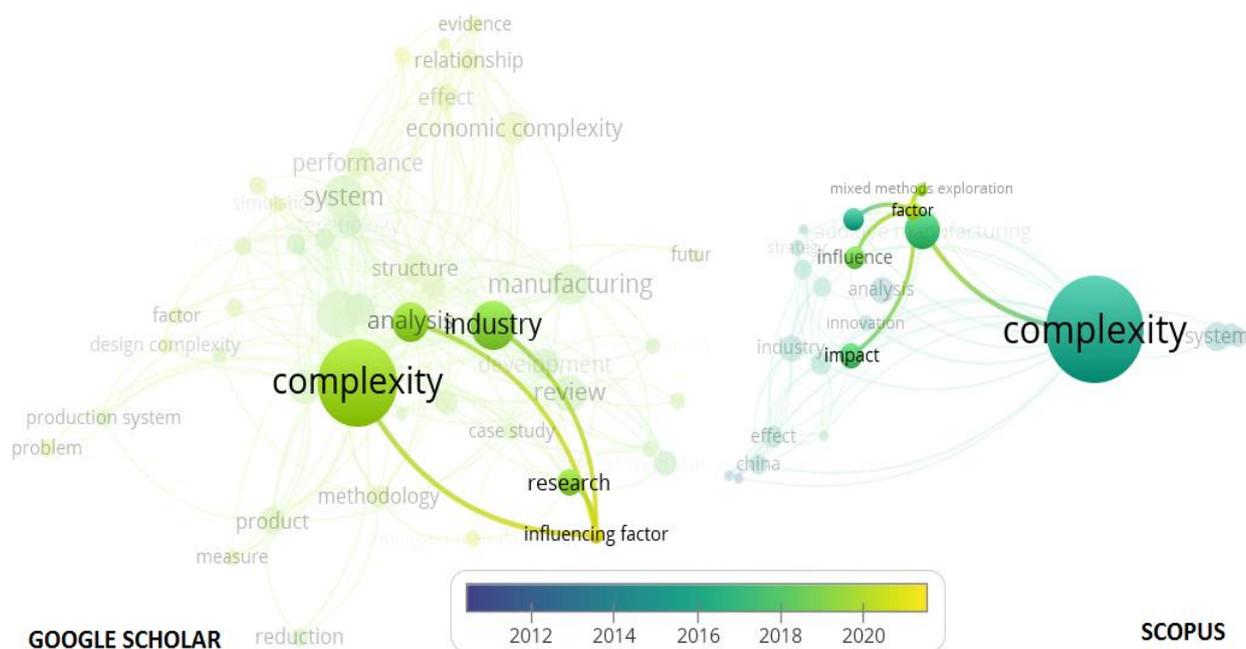
La economía de un país se fortalece con el desarrollo de la industria manufacturera, gracias a la creación de valor de las materias primas y a la generación de fuentes de empleo. En países latinoamericanos existe gran proporción de empresas en el sector industrial pertenecientes a la Micro, Pequeña y Mediana Empresa (Pymes), su clasificación se debe a el monto de las ventas brutas, el número de empleados, los activos totales, las tasas de impuestos u otros mecanismos o fórmulas económicas [7]. Cabe considerar, que los gerentes de las PyMes se enfrentan a grandes desafíos, dado que no solamente se debe tener habilidad, agilidad y calidad sino también ser competitivo y estratégico en los negocios [8][9]. Por tradición, estas PyMes han servido de apoyo a las grandes empresas, de acuerdo con [10][283] esto se ve reflejado gracias a la alta variedad de productos y servicios que ofrecen. Por lo anterior, se genera un interés investigativo por buscar medidas que brinden un fortalecimiento productivo y competitivo, focalizados en la reducción de costos, mejora de la calidad, tiempos de entrega, flexibilidad, velocidad de respuesta y personalización.

Consecuente a esto, [11] establece que un aumento en la flexibilidad en los procesos de fabricación y variedad en los productos ocasionan una mayor complejidad en el sistema. Entendiéndose por sistema complejo aquel que está compuesto por un gran número de partes que interactúan de manera no simple [12]. De acuerdo con [13] también hay que tener en cuenta el número de piezas, los tipos de procesos, el tipo de operación y la estabilidad de la programación de la producción. Según [14] existen factores determinantes en la complejidad de la fabricación como: (i) la estructura del producto; (ii) la estructura de la planta; (iii) las funciones de planificación y programación; (iv) el flujo de información durante el proceso; (v) el dinamismo, la variabilidad y la incertidumbre del entorno, y (vi) otras funciones dentro de la organización como capacitación e información.

Mediante el uso de del software Publish or Perish aplicado a la base de datos Scopus (152 documentos) y Google Scholar (290 documentos), fue posible identificar trabajos de investigación

en los últimos cinco años (2016-2021). Evidenciando volumen de publicaciones, autores relevantes y tendencias relacionadas con el tema abordado "complejidad en sistemas de fabricación". La información obtenida fue depurada y analizada mediante el software VosViewer. La figura 18 muestra un estudio de las palabras más utilizadas incluidas en los títulos, resúmenes y palabras clave. Es evidente, en ambas bases de datos, que las investigaciones recientes se enmarcan hacia la influencia de los factores que afectan a la complejidad en los entornos industriales. Este aspecto hace que el presente capítulo sea relevante e innovador.

Figura 18. Palabras más relevantes en base de datos



Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, es posible abstraer de la Figura 17 el enfoque de la complejidad industrial en dos vectores: (i) la complejidad manufacturera, formando un conjunto de enfoques de fabricación aditiva, automatizada, sostenible, ajustada e inteligente y (ii) la complejidad económica con elementos de relaciones entre agentes, índices de rendimiento y análisis de efectos. Para este caso, es importante destacar el trabajo desarrollado por el observatorio de la Complejidad Económica, que utiliza una herramienta analítica para entender la dinámica del rendimiento económico en los sistemas industriales [284].

Es aquí donde radica el componente de innovación, dado que una complejidad incontrolada genera un aumento en los gastos y en los costos operacionales. Y actualmente los modelos de manufactura están orientados a la personalización en masa y a las estrategias lean, enfocadas en diseños de alta calidad, bajo costo, ágiles, flexibles y eficientes. Desde una perspectiva geográfica, como se mencionó en capítulos anteriores, los estudios de complejidad en países latinoamericanos tienen un alto grado de escasez, por lo tanto, es un aspecto débil en los sistemas de manufactura y cadenas de suministro para gestionar, reducir o eliminar los factores que la generan.

4.3 Hipótesis

Partiendo de lo anterior, se formulan cinco (5) hipótesis, que justifican la necesidad de desarrollar este análisis estadístico:

- **(H1)**- Los subsectores económicos, tienen un efecto en la complejidad de los sistemas de manufactura
- **(H2)**- Los tipos de operaciones, tienen un efecto en la complejidad de los sistemas de manufactura
- **(H3)**- Los tipos de procesos, tienen un efecto en la complejidad de los sistemas de manufactura
- **(H4)**- Las variables identificadas en los elementos de los sistemas de manufactura tienen una influencia positiva o negativa entre ellas
- **(H5)**- Las características de manufactura, se asocian con la complejidad de los elementos de un sistema.

4.4 Metodología

Metodológicamente para llevar a cabo el abordaje de este capítulo se necesita de seis etapas, (i) Tipo y método de investigación, (ii) Fuente y técnica de recolección de información, (iii) Población, muestra y tratamiento de la información, (iv) Ficha técnica propuesta, (v) Técnica aplicada de estudio y (vi) Análisis estadístico (Ver figura 19).

Figura 19. Metodología propuesta para el análisis estadístico de la complejidad



Fuente: Elaboración propia

4.4.1 Tipo y método de investigación

Con el propósito de poder ejercer la práctica investigativa, fue necesario acudir a un estudio de carácter descriptivo explicativo de acuerdo con [285], el cual sugirió la relación de variables, interpretadas por medio del análisis de información [286].

4.4.2 Fuente y técnica de recolección de información

Teniendo en cuenta la revisión de la literatura con la temática en capítulos anteriores. Para la recolección de los datos e información, se hizo la construcción de una encuesta estructurada, a partir de los elementos claves de un sistema de producción.

Figura 20. Formato de encuesta de complejidad para sistemas de manufactura

FORMATO DE COMPLEJIDAD EN SISTEMAS DE MANUFACTURA					
Producto	Complejidad Muy Baja	Complejidad Baja	Complejidad Moderada	Complejidad Alta	Complejidad Muy Alta
Que tan complejo es el diseño y desarrollo del producto	1	2	3	4	5
Que tan complejo es controlar la cantidad del producto	1	2	3	4	5
Que tan complejo es controlar la calidad del producto	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la gestión de distribución del producto	1	2	3	4	5
Que tan complejo es definir el tamaño de los lotes	1	2	3	4	5
Que tan complejo es empacar y embalar el producto	1	2	3	4	5
Proceso	Complejidad Muy Baja	Complejidad Baja	Complejidad Moderada	Complejidad Alta	Complejidad Muy Alta
Que tan complejo es el diseño del proceso	1	2	3	4	5
Que tan complejo es el control del proceso	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la gestión de manejo de materiales	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la gestión del transporte interno	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la estandarización operacional	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la medición de puestos de trabajo	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la selección de equipos y tecnología	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la gestión de mantenimiento de los equipos	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la gestión de inventarios	1	2	3	4	5
Que tan complejo es el control de costos del proceso	1	2	3	4	5
Planta	Complejidad Muy Baja	Complejidad Baja	Complejidad Moderada	Complejidad Alta	Complejidad Muy Alta
Que tan complejo es la capacidad y distribución física	1	2	3	4	5
Que tan complejo es el medio ambiente de trabajo	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la gestión de seguridad industrial	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la gestión ambiental	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la gestión salud ocupacional	1	2	3	4	5
Personas	Complejidad Muy Baja	Complejidad Baja	Complejidad Moderada	Complejidad Alta	Complejidad Muy Alta
Que tan complejo es la gestión de capacitación	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la ergonomía en el entorno de trabajo	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la ética y el entorno de trabajo	1	2	3	4	5
Que tan complejo es el sistema de motivación e incentivos	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la gestión del clima laboral	1	2	3	4	5
Planificación	Complejidad Muy Baja	Complejidad Baja	Complejidad Moderada	Complejidad Alta	Complejidad Muy Alta
Que tan complejo es la gestión de pronósticos de la demanda	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la planeación de la capacidad	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la planeación de la producción	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la planeación de requerimiento de materiales	1	2	3	4	5
Que tan complejo es la planificación de requerimiento de recursos	1	2	3	4	5

El diseño del cuestionario se enmarca en dos partes, una primera presentada previamente en la figura 17 para determinar los efectos y factores de la complejidad en el sector manufacturero. Y una segunda parte que aborda este capítulo, que comprende el análisis estadístico de la complejidad en los sistemas de manufactura, estructurado por cinco (5) grupos asociados a producto, proceso, planta, personas y planeación, y 31 variables. La figura 20 evidencia el cuestionario diseñado y el desglose de cada una de sus partes.

4.4.3 Población, muestra y tratamiento de la información

A partir del estudio desarrollado en el capítulo 3, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la tabla 15, el instrumento aplicado fue dirigido a Pymes del sector manufacturero de la ciudad de Cartagena, Colombia. Para la selección de las empresas se tuvieron en cuenta los subsectores más representativos, tomando como criterio la cantidad de cada uno. Dentro de estos se encuentran: (i) Elaboración de productos alimenticios con 38 empresas. (ii) Fabricación de productos elaborados de metal, excepto maquinaria y equipo con 36 empresas. (iii) Fabricación de sustancias y productos químicos con 15 empresas. (iv) Transformación de la madera y fabricación de productos de madera y de corcho, excepto muebles con 14 empresas. (v) Fabricación de productos de caucho y de plástico con 13 empresas y (vi) Actividades de impresión y de producción de copias a partir de grabaciones originales con 12 empresas. Dado lo anterior, se identificaron las empresas de cada subsector económico (población), como criterio muestral se eligieron las que representan el 70% de participación acumulada. En cifras equivalen a 71 empresas de un total de 128.

4.4.4 Ficha técnica propuesta

La ficha técnica está compuesta por ítems como sector de aplicación, subsectores económicos, tamaño de la población y proceso de recolección. En la tabla 22 se relacionan los elementos relevantes del diseño muestral.

Tabla 22. Metadatos de la técnica aplicada

Lugar	Cartagena, Colombia
Sector de aplicación	Pymes del sector manufacturero
Subsectores económicos	Empresas de fabricación de productos alimenticios (38), Metalmecánico (36), Químico (15), Madera (14), Plástico (13) y Litográfico (12).
Tamaño de la población	128 empresas
Proceso de recolección	Muestra
Tamaño de la muestra	71 empresas
Distribución de la muestra	Alimenticios (13), Metalmecánico (20), Químico (11), Madera (10), Plástico (9) y Litográfico (8).
Unidad de análisis	Gerentes y administradores del área de producción
Sistema de procesamiento	Microsoft Excel, Statgraphics v18 y Jupyter

Fuente: Elaboración propia

4.4.5 Técnica aplicada de estudio

La técnica utilizada para medir y estudiar la complejidad es el uso de cuestionarios utilizando escalas Likert, los resultados obtenidos son analizados estadísticamente o por técnicas de la teoría fundamentada. Esta técnica ha sido de interés por investigadores, en [252], se aplicó un cuestionario a 500 gerentes de planta para probar el impacto de la complejidad sobre el rendimiento de los sistemas de fabricación. En [22] se utilizan cuestionarios en 209 plantas de fabricación de diversas industrias en siete países de diferentes regiones geográficas del planeta para estudiar que fuentes añaden complejidad y generan un impacto en el desempeño empresarial. Consecuentemente, [287] utilizaron esta técnica para estudiar la complejidad exactamente en siete (7) organizaciones del polígono industrial de Rusail (Mascate), concluyendo la poca claridad y falta de atención por parte de los fabricantes y académicos. En [253] a partir de los cuestionarios en 143 empresas alemanas se investiga los efectos de complejidad del producto en la agilidad y adaptabilidad de la cadena de suministro en función del costo y el rendimiento operativo. Más recientemente, [288] a través de una encuesta en 136 empresas, investigó el grado de implementación de los métodos de gestión de la complejidad y el impacto de los factores de complejidad en varias industrias, identificando cómo la industria se está quedando atrás en el campo de la gestión de la complejidad. En [289], a través de cuestionarios distribuidos a 150 empresas de Kuwait que trabajan en proyectos, se recopilaron datos cuantitativos, con el objetivo de estudiar la complejidad en la industria. La tabla 23 enumera, por orden cronológico, las investigaciones pertinentes sobre la aplicación de técnicas de cuestionario para analizar la complejidad en los sistemas de fabricación.

Tabla 23. Relación de autores con aplicación de técnica de cuestionarios

Autor	Evaluación
Coronado (2016) [20]	Análisis del efecto de la complejidad
Blome et al. (2014) [92]	Transferencia de conocimientos y flexibilidad
Abdullah et al. (2014) [264]	Impacto de la complejidad operativa
Manuj and Sahin (2011) [15]	Impulsores de la complejidad de la cadena de suministro
Gröbler et al. (2006) [118]	Adaptación de los procesos a la creciente complejidad
Novak and Eppinger (2001) [87]	La complejidad de los productos y la cadena de suministro

Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que para el diseño y aplicación del instrumento se estudiaron los antecedentes desarrollados por [15][20][22][48][64][87][92][252][253][287-289]. Se tomó como base en el cuestionario utilizado en la metodología de análisis de la complejidad diseñada por la Universidad de Bayreuth, enmarcada en un proyecto de investigación financiado por el Ministerio Federal de Economía y Tecnología de Alemania. Asimismo, se complementó con el instrumento desarrollado por [184] que se centra en determinar la percepción de la complejidad en un entorno empresarial, siendo aprobado por la Corporación Volvo Cars.

Para la aplicación de la técnica de escala Likert, inicialmente se definieron los elementos pertenecientes al sector manufacturero, tales como: (i) producto, (ii) proceso, (iii) planta, (iv)

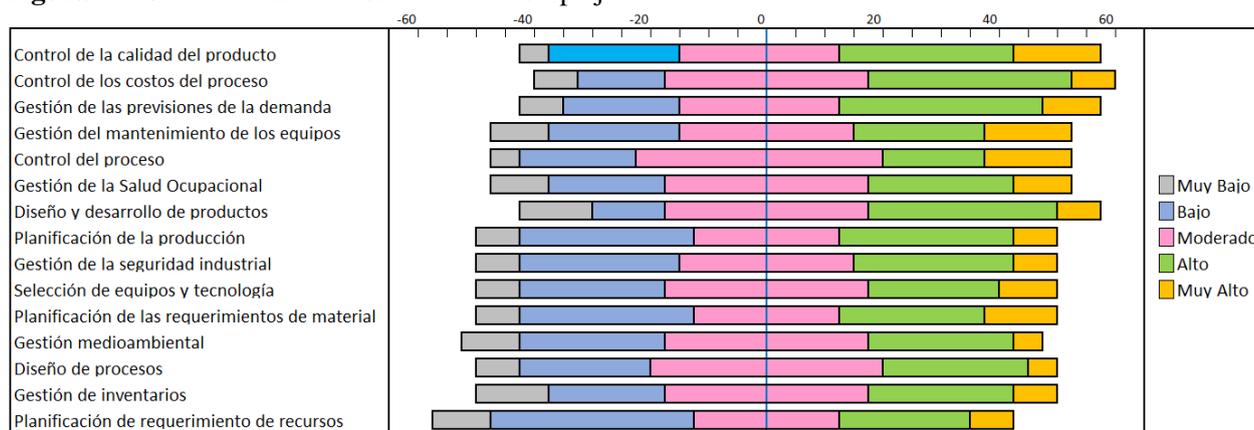
personas y (v) planificación. Y se estructuraron 31 variables a evaluar. Consecuente a esto de utilizó la escala de Likert del 1 al 5. Donde 1 representa la puntuación de simple mientras que 5 representa lo absolutamente complejo. Para un análisis más detallado se consideró el valor medio por encima de la complejidad neutra o moderada. Teniendo en cuenta el valor medio global, la tabla 24 muestra una absoluta complejidad en los sistemas de manufactura.

Tabla 24. Medida de tendencia central de la complejidad en sistema de manufactura

Grupos	Código	Variables - Ítems	Media
Producto	Pr01	Diseño y desarrollo del producto	4,57746
	Pr02	Controlar la cantidad del producto	4,66197
	Pr03	Controlar la calidad del producto	4,53521
	Pr04	Gestión de distribución del producto	4,84507
	Pr05	Definir el tamaño de los lotes de los productos	4,87324
	Pr06	Empacar y embalar el producto	4,85915
Proceso	Pc01	Diseño del proceso	4,52113
	Pc02	Control del proceso	4,53521
	Pc03	Gestión de manejo de materiales	4,47887
	Pc04	Gestión del transporte interno	4,67606
	Pc05	Estandarización operacional	4,60563
	Pc06	Medición de puestos de trabajo	4,64789
	Pc07	Selección de equipos y tecnología	4,56338
	Pc08	Gestión de mantenimiento de los equipos	4,70423
	Pc09	Gestión de inventarios	4,59155
	Pc10	Control de costos del proceso	4,33803
Planta	Pl01	Capacidad y distribución física	4,59155
	Pl02	Medio ambiente de trabajo	4,60563
	Pl03	Gestión de seguridad industrial	4,40845
	Pl04	Gestión ambiental	4,56338
	Pl05	Gestión salud ocupacional	4,59155
Personas	Pe01	Gestión de capacitación	4,70423
	Pe02	Ergonomía en el entorno de trabajo	4,59155
	Pe03	Ética y el entorno de trabajo	4,73239
	Pe04	Sistema de motivación e incentivos	4,74648
	Pe05	Gestión del clima laboral	4,71831
Planificación	Pn01	Gestión de pronósticos de la demanda	4,40845
	Pn02	Planeación de la capacidad	4,42254
	Pn03	Planeación de la producción	4,35211
	Pn04	Planeación de requerimiento de materiales	4,47887
	Pn05	Planificación de requerimiento de recursos	4,47887

Fuente: Elaboración propia

Mediante un análisis gráfico utilizando el software statgraphics v18 se pudo evidenciar que dentro de los criterios con una complejidad muy alta se encuentran (i) El control de la calidad del producto con un 15,49%, (ii) La gestión del mantenimiento de los equipos con un 15,49% y (iii) La planificación de requerimientos de materiales con un 11,27%. Entre los criterios con alta complejidad, destacan los siguientes: (i) El control de los costos del proceso con un 35,21%, (ii) El diseño y desarrollo del producto con un 32,39% y (iii) La gestión de las previsiones de la demanda con un 32,39% (Ver figura 21).

Figura 21. Gráfica de Likert asociada a la complejidad

Fuente: Elaboración propia

4.4.6 Análisis estadístico de validación y consistencia

El primer análisis estadístico que se desarrolla es el de determinar la fiabilidad y consistencia del instrumento aplicado. De acuerdo con [289] un instrumento es válido si mide lo que se supone que debe medir, para [287] el instrumento debe tener fiabilidad, lo que se refiere a la capacidad del medir consistentemente a lo largo del tiempo a pesar de las condiciones de la prueba o del estado de los encuestados. En este sentido se desarrolló una validación de la fiabilidad del instrumento utilizado. Para ello, se entrevistó a un grupo de académicos universitarios, directivos de PyMes y expertos o consultores del sector industrial. Se utilizó sistemáticamente el modelo de Lawshe, determinado por consenso de expertos, en función de aspectos a evaluar como la estructura, la pertinencia y la redacción. Los resultados del coeficiente de validez (CVR) en las 31 variables declaradas representan un valor mayor o igual a 0,75, por lo que cada uno de los ítems fue aprobado.

Teniendo en cuenta los resultados de las 71 encuestas, a través de las visitas de campo, y la contribución de los ejecutivos y gerentes de producción. Se realizó un análisis de consistencia del Alfa de Cronbach. Para las 31 variables elegidas, el estadístico es igual a 0,950281, siendo superior a 0,7, por lo que el instrumento se considera fiable y consistente. También se utilizó el método sistemático de test-retest, teniendo en cuenta la aplicación del instrumento en diferentes momentos. Donde el coeficiente de correlación de Pearson entre las puntuaciones es igual a 0,846612 con este índice se establece una correlación positiva muy alta, por lo que el test-retest es totalmente satisfactorio, y permite asegurar la bondad del resultado del instrumento.

4.4.7 Análisis estadístico experimental

El segundo análisis corresponde al análisis estadístico experimental de la complejidad. En esta fase se identifican los factores que influyen de manera significativa en las características asociada con la variable respuesta “Alta complejidad”, tomando los resultados de los encuestados por encima de 4. Los factores corresponden a: (i) Subsector económico de manufactura, (ii) Tipo de operación y (iii) Tipo de proceso.

Inicialmente se plantean las hipótesis:

- **(H1)**- Los subsectores económicos, tienen un efecto en la complejidad de los sistemas de manufactura
- **(H2)**- Los tipos de operaciones, tienen un efecto en la complejidad de los sistemas de manufactura
- **(H3)**- Los tipos de procesos, tienen un efecto en la complejidad de los sistemas de manufactura

Seguidamente, se utilizó la técnica diseño de experimentos para determinar el nivel de significancia que tienen los factores por medio de un análisis de varianzas o tabla de anova. En la tabla 25, se puede apreciar que los factores tipo de operación y tipo de proceso, presentan un p-valor menor que 0,05, tanto en los efectos principales como en las interacciones; por lo que se rechaza la hipótesis nula, dado lo anterior se puede inferir que estos dos factores influyen significativamente sobre la alta complejidad en los sistemas de manufactura de Pymes de la ciudad de Cartagena – Colombia.

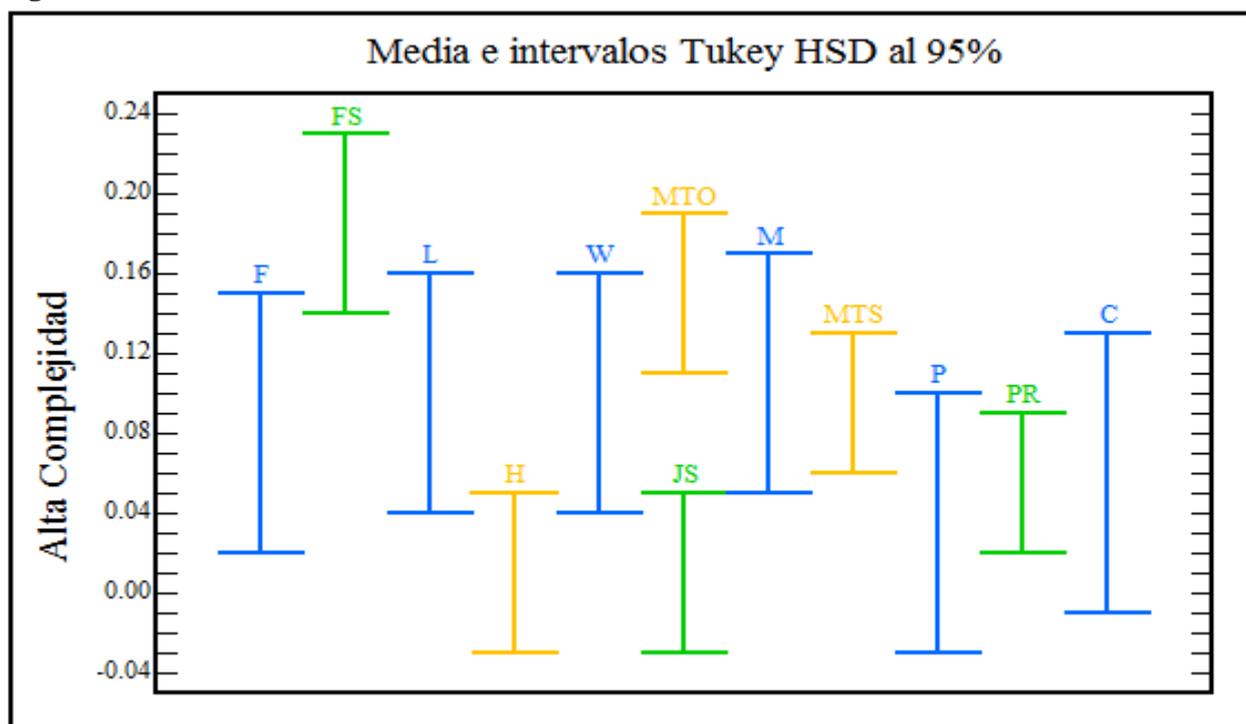
Tabla 25. Análisis de varianza para la alta complejidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos Principales					
A:Subsector	0,0440094	5	0,00880188	1,15	0,3696
B:Tipo de Operación	0,183875	2	0,0919373	11,96	0,0004
C:Tipo de Proceso	0,324389	2	0,162195	21,10	0,0000
Interacciones					
AB	0,162308	10	0,0162308	2,11	0,0743
AC	0,141538	10	0,0141538	1,84	0,1177
BC	0,176887	4	0,0442218	5,75	0,0030
Residuos	0,153723	20	0,00768617		
Total (Corregido)	1,18673	53			

Fuente: Elaboración propia

A partir de esto, se realiza un análisis de gráficos mediante el software Statgraphics Centurion v18, para comparar los diferentes niveles de los factores con respecto a la variable de alta complejidad que se está analizando. Los resultados obtenidos indican que no existe diferencia significativa al comparar los subsectores económicos, sin embargo los subsectores (F), (L), (W) y (M) generan una mayor complejidad que el subsector (P) y (C). Del mismo modo, el análisis se realizó teniendo en cuenta el factor de tipo de proceso, los resultados obtenidos indican que no existe una diferencia significativa al comparar el (JS) y el (PR). Sin embargo, el (FS) se diferencia de todos los demás y con un mayor impacto en la variable de alta complejidad (Como se representa en la figura 22).

Figura 22. Gráfica de medias de los factores



Cabe destacar que los entornos (FS) se caracterizan porque todas las actividades deben realizarse en el mismo orden para la fabricación del producto, el volumen a fabricar es elevado, tiene pocas referencias y son continuas. Según [15] el procesamiento debe cumplir una serie de etapas, el número de máquinas es diferente de una etapa a otra. Y a medida que las organizaciones crecen y se expanden para satisfacer su demanda, tienden a tener operaciones de fabricación cada vez más complejas.

En cuanto al tipo de operación, los resultados obtenidos indican que no hay diferencias significativas cuando se comparan los tipos (MTO) y (MTS), ya que estos generan la mayor complejidad. Esto se debe a que existen variables asociadas a la cantidad, el tiempo y los costos que se pueden controlar en un proceso de fabricación. Haciendo un análisis de la relación entre el tipo de proceso y el tipo de operación, los resultados indican que la relación es significativa, por lo que se alcanzan altos niveles de complejidad cuando el tipo de operación es (MTO) y (MTS) y cuando el tipo de proceso es (FS) (ver figura 22). Finalmente, se verificaron los supuestos del modelo, teniendo en cuenta las pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de los datos. Lo que dejan entrever esos cumplimientos.

4.4.8 Análisis estadístico factorial

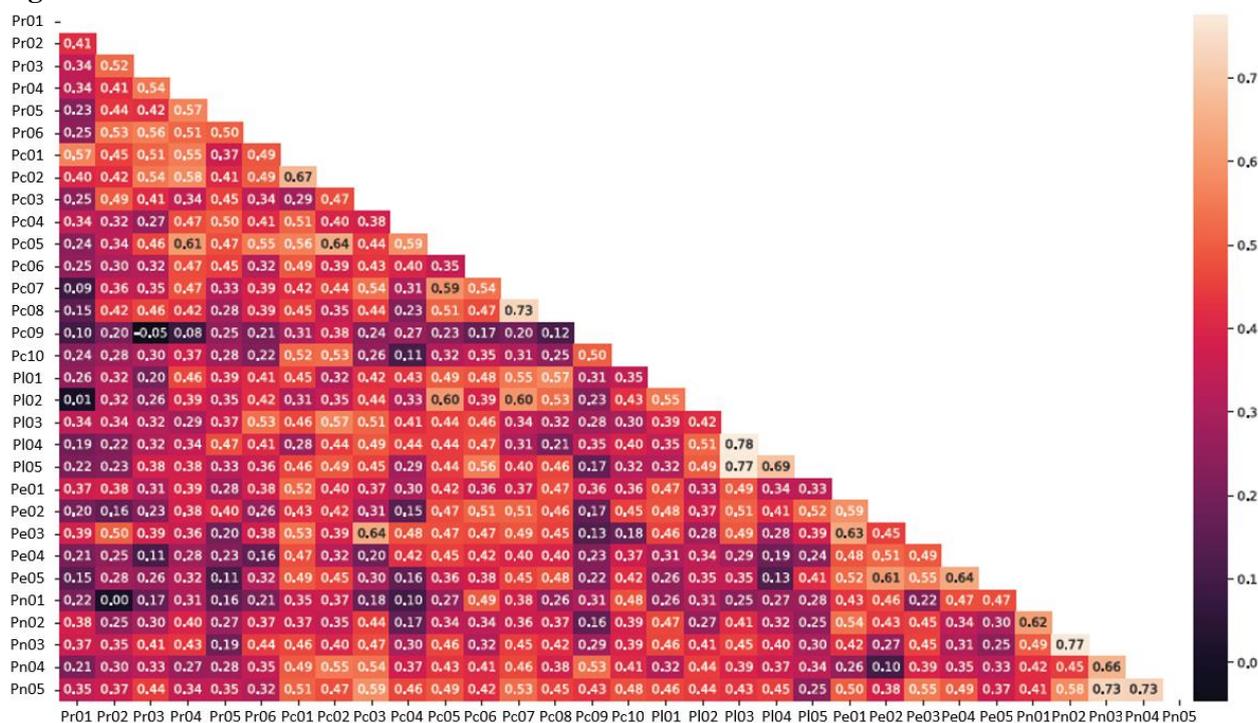
Este apartado permite desarrollar una técnica estadística, para encontrar agrupaciones de las variables correlacionadas con otras. De manera que se pueda hacer una depuración con respecto a la cantidad de variables no correlacionadas. Cabe destacar que existen 31 variables representados de la siguiente manera, (i) De acuerdo al elemento producto una cantidad de seis variables, (ii) De acuerdo al proceso una cantidad de diez, (iii) De acuerdo a la planta una cantidad de cinco, (iv) De

acuerdo al personal una cantidad de cinco y (v) De acuerdo a la planificación una cantidad de cinco (Ver tabla 24). Dado lo anterior, se plantea la hipótesis:

- **(H4)**- Las variables identificadas en los elementos de los sistemas de manufactura tienen una influencia positiva o negativa entre ellas

A partir de una matriz se ubican las correlaciones entre todas las variables consideradas (Ver figura 23). El Índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) indica que tan apropiado es aplicar el análisis factorial, lo cual especifica que corresponde a un valor de 0.79 siendo adecuado, dado que desde 0.8 en adelante se considera un buen resultado. De igual forma el test de esfericidad de Bartlett, que permite corroborar las hipótesis, donde el p-valor es menor que 0,05 por tanto se rechaza la hipótesis nula y se continúa con el análisis.

Figura 23. Matriz de correlación de variables



Consecuentemente, a partir de la figura 23, se extraen los principales factores que cumplen con el requisito (valores propios >1). El resultado es un modelo de seis (6) factores relevantes (Eta) para resumir las variables originales del estudio. Teniendo en cuenta lo anterior, un cierto número de variables se agrupan para un factor específico (Como se representa en la tabla 26).

Tabla 26. Grupos de factores relevantes

Grupo	Factores extraídos
Eta1	Pr011 + Pr02 + Pr03 + Pr04 + Pr05 + Pr06 + Pc01 + Pc02 + Pc04 + Pc05
Eta2	Pc07 + Pc08 + PI01 + PI02
Eta3	PI03 + PI04 + PI05
Eta4	Pc09 + Pc10 + Pn02 + Pn03 + Pn04 + Pn05
Eta5	Pc06 + Pe01 + Pe02 + Pe04 + Pe05 + Pn01
Eta6	Pc03 + Pe03

La tabla 27 especifica los altos grados de correspondencia entre la variable y el factor, las altas cargas indican que la variable es representativa para el factor.

Tabla 27. Análisis de extracción de componentes principales

VARIABLES	Código	Eta 1	Eta 2	Eta 3	Eta 4	Eta 5	Eta 6
Diseño y desarrollo del producto	Pr01	0.518	-0.464	0.010	0.074	0.114	0.304
Controlar la cantidad del producto	Pr02	0.633	0.070	-0.096	-0.053	-0.108	0.263
Controlar la calidad del producto	Pr03	0.746	0.047	-0.075	-0.054	-0.090	0.095
Gestión de distribución del producto	Pr04	0.807	0.169	-0.132	-0.084	0.106	-0.137
Definir el tamaño de los lotes	Pr05	0.620	0.122	0.179	-0.034	-0.116	-0.148
Empacar y embalar el producto	Pr06	0.633	0.101	0.099	-0.017	-0.105	0.042
Diseño del proceso	Pc01	0.694	-0.158	-0.110	0.085	0.336	0.043
Control del proceso	Pc02	0.624	-0.091	0.106	0.187	0.127	-0.117
Gestión de manejo de materiales	Pc03	0.050	0.282	0.266	0.201	-0.182	0.400
Gestión del transporte interno	Pc04	0.494	0.040	0.140	0.047	-0.131	0.112
Estandarización operacional	Pc05	0.521	0.355	0.008	0.021	0.065	-0.057
Medición de puestos de trabajo	Pc06	0.109	0.210	0.233	0.000	0.302	0.063
Selección de equipos y tecnología	Pc07	0.052	0.759	-0.138	0.063	0.204	0.072
Gestión de mantenimiento de equipos	Pc08	0.133	0.652	-0.172	-0.098	0.268	0.183
Gestión de inventarios	Pc09	-0.036	-0.055	0.117	0.602	0.010	-0.159
Control de costos del proceso	Pc10	0.173	-0.039	0.009	0.481	0.324	-0.303
Capacidad y distribución física	PI01	0.125	0.384	0.032	0.111	0.137	0.121
Medio ambiente de trabajo	PI02	0.023	0.622	0.159	0.178	0.018	-0.146
Gestión de seguridad industrial	PI03	-0.021	-0.202	0.903	0.003	0.090	0.296
Gestión ambiental	PI04	-0.030	-0.053	0.932	0.214	-0.157	-0.031
Gestión salud ocupacional	PI05	0.037	0.070	0.720	-0.179	0.219	0.054
Gestión de capacitación	Pe01	0.047	-0.039	0.094	0.042	0.517	0.340
Ergonomía en el entorno de trabajo	Pe02	-0.109	0.156	0.298	-0.231	0.789	0.056
Ética y el entorno de trabajo	Pe03	0.045	0.082	0.091	-0.123	0.316	0.750
Sistema de motivación e incentivos	Pe04	-0.036	0.132	-0.113	0.099	0.613	0.121
Gestión del clima laboral	Pe05	-0.031	0.154	-0.063	-0.087	0.757	0.136
Gestión de pronósticos de la demanda	Pn01	-0.211	0.012	-0.043	0.503	0.550	-0.094
Planeación de la capacidad	Pn02	-0.082	-0.012	-0.002	0.485	0.222	0.313
Planeación de la producción	Pn03	0.022	0.085	-0.057	0.712	-0.080	0.295
Planeación requerimiento materiales	Pn04	0.044	0.176	-0.041	0.816	-0.198	0.063
Planificación requerimiento recursos	Pn05	0.004	0.160	-0.056	0.692	-0.007	0.279

Fuente: Elaboración propia

Los resultados evidencian diferentes componentes principales (ETA), y cada componente tiene agrupadas sus respectivas variables. Lo anterior permite corroborar la hipótesis, dado que existen correlaciones altas entre los factores

4.4.9 Análisis de asociatividad de la complejidad

Esta sección comprende el interés de evaluar la asociación entre la complejidad de las características de manufactura conformadas por los (i) subsectores económicos, (ii) tipos de operación y (iii) tipo de procesos y la complejidad de los elementos como: (i) producto, (ii) proceso, (iii) planta, (iv) personas y (v) planificación. A partir de la muestra tomada con

anterioridad, se plantean la hipótesis:

- **(H5)**- Las características de manufactura, se asocian con la complejidad de los elementos de un sistema.

En la tabla 28 se puede apreciar la aplicación de la prueba chi cuadrado y los resultados del p-valor con un nivel de significancia del 0,05. Es evidente que la complejidad del control de calidad del producto está asociada con el tipo de operación, la gestión de inventario y de seguridad industrial depende del tipo de proceso y la gestión ambiental depende del tipo subsector. Esto debido a que el resultado de la p-valor es menor al nivel de significancia, por tanto se rechaza la hipótesis nula y acepta la hipótesis alternativa. De igual forma se establece que las demás asociaciones entre las diversas características y elementos son independientes.

Tabla 28. Análisis de resultados de la prueba chi-cuadrado

Items	Tipo Subsector	Tipo Operación	Tipo Proceso
Diseño y desarrollo del producto	0.2123	0.8339	0.5584
Controlar la cantidad del producto	0.1500	0.8339	0.0533
Controlar la calidad del producto	0.2612	0.0409	0.1160
Gestión de distribución del producto	0.0563	0.4381	0.6605
Definir el tamaño de los lotes	0.4864	0.8728	0.0710
Empacar y embalar el producto	0.9104	0.4791	0.6064
Diseño del proceso	0.0787	0.6265	0.1614
Control del proceso	0.2177	0.3418	0.5199
Gestión de manejo de materiales	0.8226	0.2683	0.8298
Gestión del transporte interno	0.4223	0.9716	0.6237
Estandarización operacional	0.9480	0.5266	0.5815
Medición de puestos de trabajo	0.1078	0.3195	0.9091
Selección de equipos y tecnología	0.7253	0.8792	0.9703
Gestión de mantenimiento de equipos	0.8539	0.5973	0.0882
Gestión de inventarios	0.3597	0.2086	0.0375
Control de costos del proceso	0.2571	0.2405	0.0788
Capacidad y distribución física	0.5432	0.8431	0.2971
Medio ambiente de trabajo	0.0545	0.3571	0.1881
Gestión de seguridad industrial	0.1570	0.5452	0.0412
Gestión ambiental	0.0473	0.5452	0.4615
Gestión salud ocupacional	0.1404	0.7487	0.4672
Gestión de capacitación	0.7621	0.4397	0.1864
Ergonomía en el entorno de trabajo	0.5946	0.6949	0.3469
Ética y el entorno de trabajo	0.3023	0.1716	0.4653
Sistema de motivación e incentivos	0.4368	0.7725	0.0794
Gestión del clima laboral	0.3561	0.4649	0.3802
Gestión de pronósticos de la demanda	0.8509	0.4361	0.7077
Planeación de la capacidad	0.6615	0.9102	0.9276
Planeación de la producción	0.7810	0.9507	0.9638
Planeación requerimiento materiales	0.0724	0.2833	0.2747
Planificación requerimiento recursos	0.3343	0.8424	0.7878

Fuente: Elaboración propia

4.5 Conclusiones del capítulo

Este capítulo se basó en el desarrollo de un análisis estadístico de la complejidad en los sistemas de manufactura. El estudio se aplicó en el sector manufacturero de la ciudad de Cartagena, Colombia, tomando como muestra 71 empresas Pymes de la industria. Los resultados obtenidos de la técnica Likert permitieron identificar las características vinculadas a la alta complejidad. Un estudio experimental da respuesta a las hipótesis planteadas, en las que se corrobora que no existen diferencias significativas al comparar los subsectores económicos (Hipótesis 1), así como con los tipos de operación (MTO) y (MTS) y que ambos generan una alta complejidad (Hipótesis 2). Sin embargo, al comparar los tipos de procesos, el tipo (FS) tiene un mayor impacto en la complejidad (Hipótesis 3). Un análisis factorial pudo establecer que existen altas correlaciones entre los factores y un análisis de asociatividad determinó que existe una relación entre las variables de estudio y las características del sistema de fabricación. (Hipótesis 4). Siendo evidente que la complejidad del control de la calidad del producto depende del tipo de operación, la gestión del stock y la seguridad industrial depende del tipo de proceso y la gestión medioambiental depende del tipo de subsector.

Capítulo 5

Modelamiento y análisis de la complejidad en sistemas de manufactura

5.1 Objetivo

- **(OE3)**- Estudiar la relación existente entre las características y elementos de un sistema manufactura con respecto a la complejidad, de diferentes sectores económicos, que permitan la determinación del nivel de significancia entre subsectores, tipo de operación y tipo de proceso y a su vez un mayor entendimiento respecto a indicadores de desempeño.

5.2 Hipótesis

La manufactura es un proceso de transformación de entidades, en el que se agrega valor para la final obtener un bien tangible. Para su desarrollo se hace necesario de procesos unietapa o multietapas, donde participan una serie de elementos como entradas, instalaciones, actividades, recursos y controles, donde la interacción de estos permite la aparición del componente de complejidad. Dado que un sistema de manufactura la intervención de estos factores generan variaciones de cantidad y variedad de los procesos, productos y servicios haciendo que los sistemas sean inestables y complejos. Estos se ven reflejados en (i) con los materiales cuando no cumplen especificaciones de tiempo, cantidad y calidad, (ii) con la mano de obra cuando se presentan cambios de ritmo de trabajo, ausentismo y accidentes, (iii) con las maquinas cuando fallan, ausencia de repuestos y herramientas.

De acuerdo al objetivo propuesto y a lo anteriormente descrito, se formulan dos (2) hipótesis, que justifican la necesidad de desarrollar el modelamiento y análisis de la complejidad en sistemas de manufactura:

- **(H6)**- Los factores diseño estructural, tiempo de producción por etapa, frecuencia de tiempo de llegadas de materias primas y cantidad de llegadas de materias primas, tiene un efecto sobre la complejidad de los sistemas de manufactura.
- **(H7)**- La complejidad en los sistemas de manufactura influyen en las medidas de desempeño de tiempo de ciclo, eficiencia, productos terminados, productividad, Throughput, productos en procesos y costos de producción.

5.3 Consideraciones para el modelamiento

Partiendo de los resultados y análisis del capítulo anterior, las siguientes consideraciones fueron necesarias para el desarrollo del modelamiento y análisis de la complejidad en sistemas de manufactura:

- Los factores tipo de operación (MTO, MTS, H) y tipo de proceso (FS, JS, PR), presentan

un p-valor menor que 0,05, tanto se puede inferir que influyen significativamente sobre la alta complejidad en los sistemas de manufactura de Pymes de la ciudad de Cartagena – Colombia (ver tabla 25)

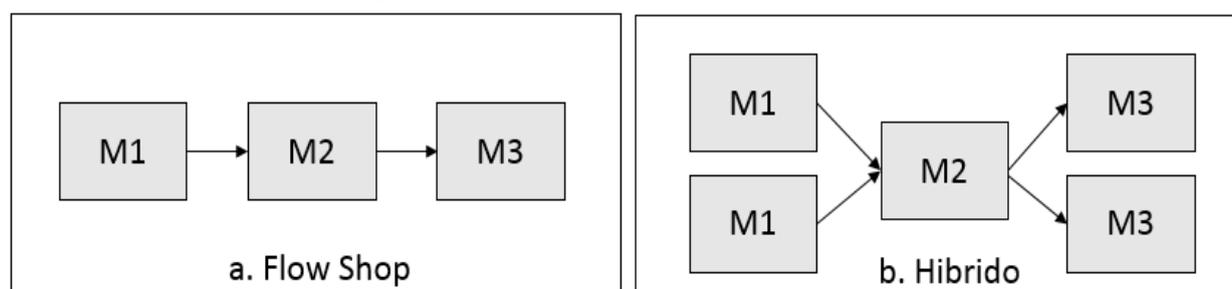
- El tipo de proceso (FS) tiene un mayor impacto en la complejidad, comparado con comparar el (JS) y el (PR), (ver figura 22).
- Los entornos (FS) se caracterizan porque todas las actividades deben realizarse en el mismo orden para la fabricación del producto, el volumen a fabricar es elevado, tiene pocas referencias y son continuas.
- Tendencia alta hacia mediciones de la complejidad estática y una baja proyección hacia la complejidad dinámica (ver figura 7 y 8).
- Mayor inclinación hacia métodos objetivos, analíticos y modelos matemáticos (ver tabla 11 y 13).

Dado lo anterior, el propósito de presente capítulo consiste en el desarrollo del modelamiento y análisis estadístico de la complejidad en sistema de manufactura, considerando ambientes Flow shop (FS) e Híbrido (H). Permitiendo la obtención de indicadores de claves de desempeño por medio de técnicas de simulación.

5.4 Modelización estructural de los sistemas

En los sistemas de manufactura las operaciones deben seguir una ruta que implica el uso de recursos. De acuerdo con [290] los productos se procesan a través de una serie de etapas de producción y el número de máquinas es diferente de una etapa a otra, algunas etapas solo tienen una máquina, mientras que otras tienen más de una. A medida que las organizaciones crecen y se expanden para satisfacer su demanda, tienden a tener operaciones de manufactura cada vez más complejas, variando su estructura de ambiente Flow shop (FS) a Híbrido (H), según [291] entre mayor complejidad existan en los sistemas, las fabricas buscan ampliar su capacidad de producción, adquiriendo maquinas paralelas adicionales en cada una de las etapas, transformando el sistema de línea de flujo a una línea de flujo híbrida. En la figura 24 se evidencia una vista esquemática de la estructura FS en comparativo con el H [290].

Figura 24. Estructura Flow Shop e Híbrido



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con [291][292] existen unas características propias de estos tipos de estructuras, (i) los productos siguen el mismo recorrido lineal en todo el sistema, (ii) los trabajos pasan de una primera etapa a la última en orden, (iii) el número de máquinas por etapas puede ser diferente, (iv) se presentan buffers para almacenar productos intermedios, (v) el flujo del proceso para cada trabajo se conoce de antelación, (vi) cada pieza se procesa como máximo en una máquina en cada etapa y (vii) el tiempo de procesamiento de cada trabajo en cada etapa que visita se conoce de antemano y es constante. En la tabla 29 se presentan diversos casos de aplicación encontrados en la literatura, en donde la mayoría pertenece a la industria de procesos.

Tabla 29. Revisión de la literatura de casos de aplicación

Industria	Año	Autor
Farmacéutica	2017	Bouras, A., Masmoudi, M., Saadani, N. E. H., & Bahroun, Z. [293]
	1996	Guinet, A.G.P., Solomon, M. [294]
Energética	2021	Ho, M. H., Hnaien, F., & Dugardin, F. [295]
	2016	Yan, J., Li, L., Zhao, F., Zhang, F., & Zhao, Q. [296]
	2013	Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M. A., & Li, W. D. [297]
Automotriz	2020	Marichelvam, M. K., Geetha, M., & Tosun, Ö. [298]
	1997	Agnetis, A., Pacifici, A., Rossi, F., Lucertini, M., Nicoletti, S., Nicolo, F., Oriolo, G., Pacciarelli, D., Pesaro, E., [299]
Circuitos impresos	2003	Alisantoso, D., Khoo, L. P., & Jiang, P. Y. [300]
	1994	Piramuthu, S., Raman, N., Shaw, M.J. [301]
	1993	Tsubone, H., Ohba, M., Takamuki, H., & Miyake, Y. [302]
Vidrio	2020	Wang, S., Wang, X., Chu, F., & Yu, J. [303]
	2017	Liu, M., Yang, X., Zhang, J., & Chu, C. [304]
	1997	Leon, V.J., Ramamoorthy, B. [305]
Petroquímica	2016	Rahmani, D., & Ramezani, R. [306]
	1998	Riane, F. [307]
	1973	Salvador, M.S. [308]
Eléctrica y Electrónica	2005	Quadt, D., Kuhn, H. [309]
	1988	Wittrock, R.J. [310]

Para el desarrollo de la modelización estructural, en este capítulo se generaron todas las combinaciones posibles considerando tres etapas dentro de un proceso y como máximo dos máquinas por etapas. Variando los tiempos en cada, donde el color amarillo representa un nivel alto y el color azul un nivel bajo. De igual forma se presenta una variación de las frecuencias de llegadas (F) y las cantidades de arribos de las entidades (Q), donde el color rojo representa un nivel alto y el color verde un nivel bajo. A cabo se establecieron distintos indicadores que permitieron evaluar y analizar cada una de las instancias (ver figura 25).

El modelamiento de los escenarios generaron 256 posibles combinaciones, brindando como resultado para cada uno, la evaluación de los indicadores de desempeño, (i) Productos terminados - Pt, (ii) Tiempo de ciclo - Tc, (iii) Productos en procesos - Wp, (iv) Throughput - Th, (v) Productividad - Pr, (vi) eficiencia - Ef y (vii) Costo de producción - Cp. Los modelos fueron implementados con la ayuda del software ProModel (Simulador de sistemas de manufactura), el

cual permitió evaluar cada estructura, considerando 1 replica (Modelo determinístico), un tipo de corrida de 24 horas y un break de 2 horas.

Figura 25. Tipos de estructuras para el modelamiento



Fuente: Elaboración propia

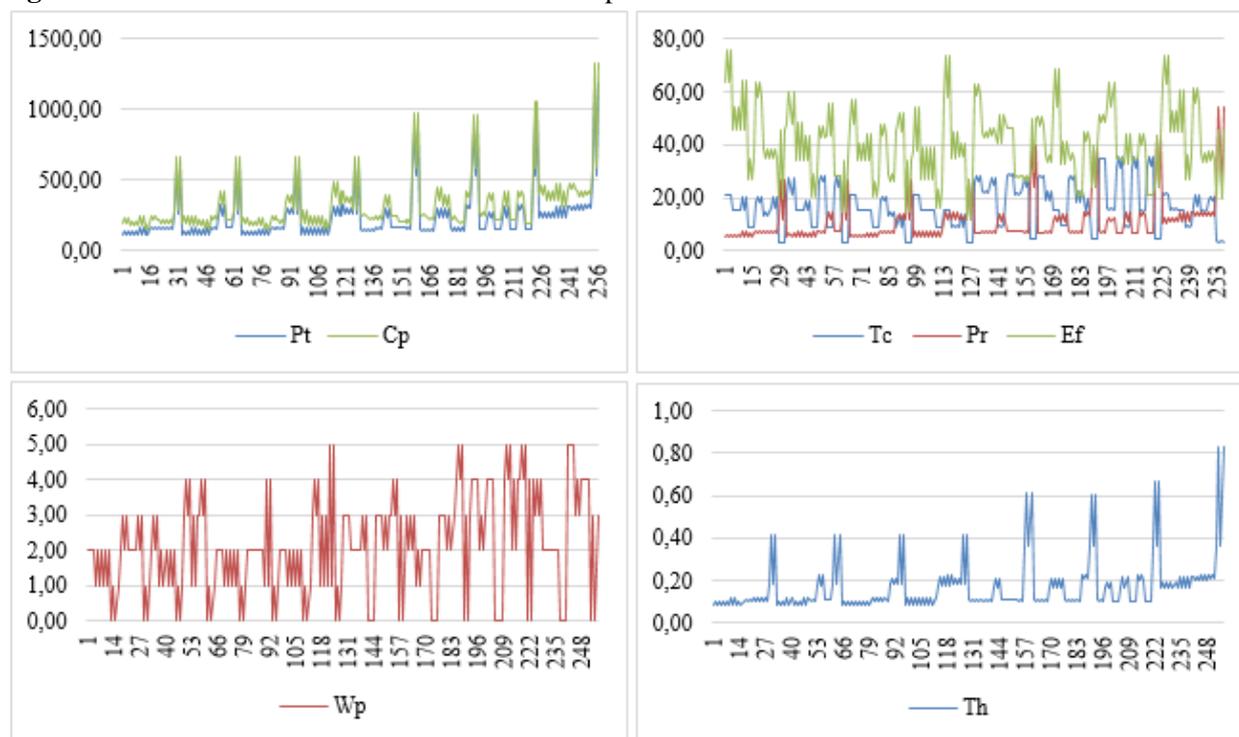
En la figura 26 se puede evidenciar un mayor rendimiento y tendencia ascendente del Pt, Cp, Pr, Th y Wp cuando se trabaja en estructuras amplias tipo H. Respecto al Tc la tendencia es descendente y favorable para estructuras tipo H. A diferencia de la Ef que tiene una tendencia descendente con mayor rendimiento en ambientes FS.

5.5 Medición de la complejidad estática y dinámica

Para efecto de la medición de la complejidad, De los métodos descritos en el capítulo 2, se tomó de referencia los métodos entrópicos, los cuales se fundamentan en ecuaciones analíticas para medir la complejidad, facilitando el análisis entrópico en diferentes tipos de escenarios y proporcionando una base cuantitativa para la toma de decisiones. Un método aplicado es la entropía de información de Shannon, siendo una técnica cuantitativa, objetiva y que permite medir

la complejidad tanto estática como dinámica. Toda la información utilizada en este apartado está definida por [210] quien fundamentó su trabajo en una teoría matemática de la información.

Figura 26. Resultados de los Indicadores de desempeño



Consecuente a esto [99][129] toman como base está teoría y la direccionan para medir la complejidad en las organizaciones industriales. En la tabla 9 y la figura 7 se puede evidenciar que en los últimos años, los principales intereses se han concentrado en las medidas de complejidad que hacen uso de la teoría de la información (TI). En la revisión de la literatura ha llamado la atención los distintos métodos disponibles para medir la complejidad en un entorno de manufactura desde este tipo de enfoque. Siendo el menos abordado y más favorable el de Entropía de Shannon (SE), por su aplicabilidad en entornos generales, operacionales y sistemáticos. Comparado con otros métodos como Kolmogorov (K), que ha sido muy utilizado en ambientes de redes y cadenas de información y suministros y el E-Machines (M) el cual es muy específico a un equipo, maquina o estación de trabajo.

Considerando lo abordado en el apartado 2.10.2, el método de Entropía de Shannon (SE) se fundamenta en la cantidad esperada de información necesaria para describir el estado de un sistema de fabricación [129]. La información aquí se utiliza en el sentido definido por [210]. Tomando como unidad de medida “bits” que corresponde a la cantidad de información requerida en para hacer una elección binaria [210]. En la literatura se desatacan dos medidas para el cálculo del rendimiento de un sistema de fabricación, uno que mide la complejidad estática del sistema (Ce) y otro para medir la complejidad de tipo dinámica (Cd). Varios autores pioneros concuerdan y difieren con la forma de medición de cada uno estos tipos. Asumiendo que existen estados asociados a las máquinas, estaciones de trabajo, colas o líneas de espera, la desviación en la programación, estimaciones de variables en el sistema y los estados fuera de control (ver tabla 30).

Tabla 30. Relación de autores y métricas para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura

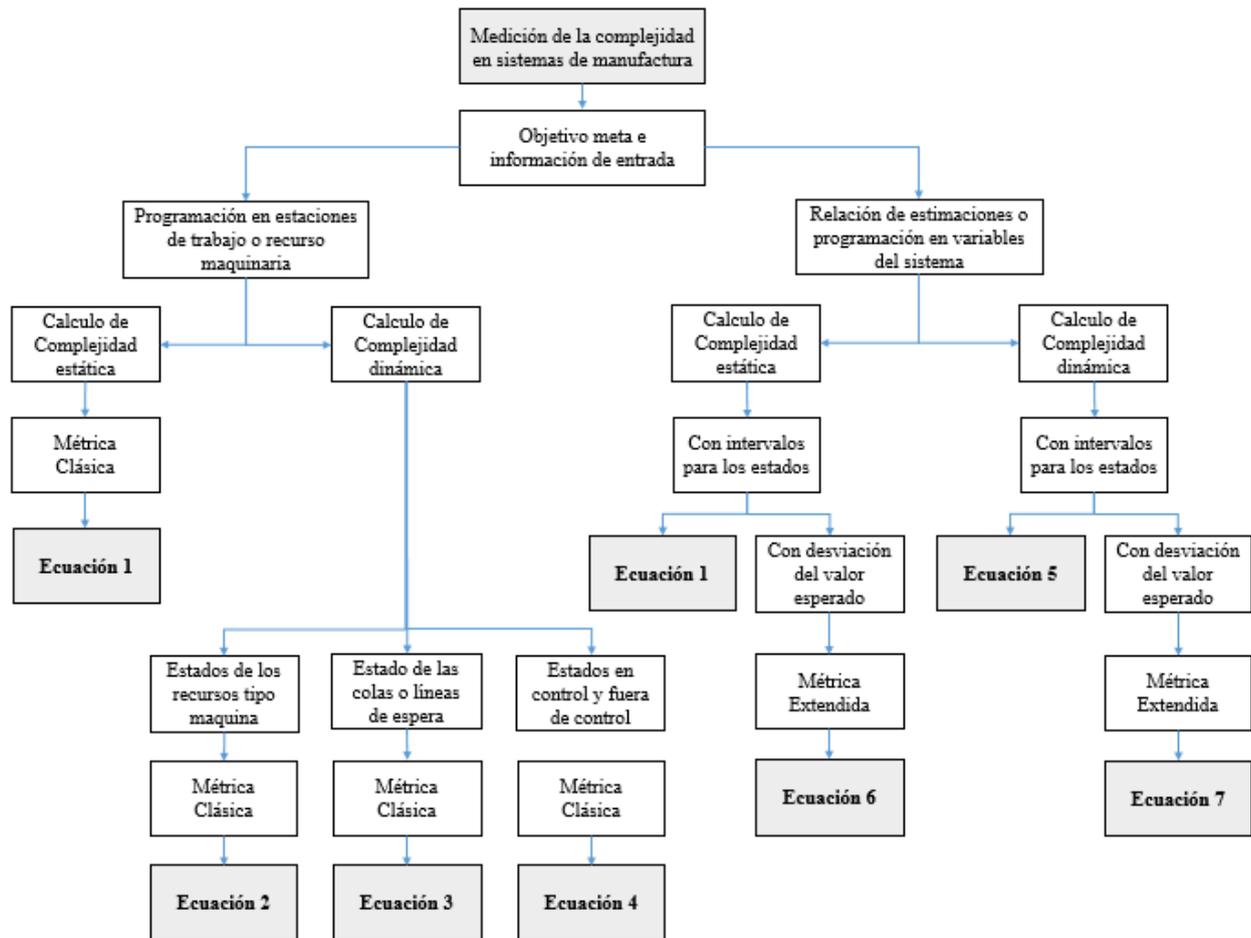
Autores	Métrica y Ecuación
Deshmukh (1998) [4]; Frizelle (1998) [311]; Calinescu (2000) [129]; Sivadasan et al. (2002) [112]; Zhang (2012) [183]; Modrak & Soltysova (2017) [110].	$C_{estática}(Ce) = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} \log_2 P_{ij} \quad (1)$
Calinescu (2000) [129]; Smart et al. (2013) [138].	$C_{dinámica}(Cd) = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P'_{ij} \log_2 P'_{ij} \quad (2)$
Frizelle (1998) [311]; Calinescu (2000) [129]; Smart et al. (2013) [138].	$C_{dinámica}(Cd) = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P'_{ij} \log_2 P'_{ij} - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^Q \sum_{k=1}^q P'_{ijk} \log_2 P'_{ijk} \quad (3)$
Frizelle (1998) [311]; Smart et al. (2013) [138].	$C_{dinámica}(Cd) = - \sum_{i=1}^M (P_i \log_2 P_i + (1 - P_i) \log_2 (1 - P_i)) \quad (4)$
Deshmukh (1998) [4]; Frizelle (1998) [311]; Calinescu (2000) [129]; Sivadasan et al. (2002) [112].	$C_{dinámica}(Cd) = -(1 - P) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} \log_2 P_{ij} \quad (5)$
Isik (2010) [97]; Isik (2011) [122].	$C_{estática}(Ce) = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\log_2 P_{ij}] d_{ij} P_{ij} \quad (6)$
Isik (2010) [97]; Isik (2011) [122].	$C_{dinámica}(Cd) = -(1 - P) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\log_2 P_{ij}] d_{ij} P_{ij} \quad (7)$

Fuente: Elaboración propia

La figura 27 evidencia estructuralmente las características para la aplicación de cualquier tipo de ecuación. Cabe resaltar que independientemente de la métrica empleada, siempre va a ser necesario la información proveniente del proceso y del seguimiento de las variables en el tiempo.

Independientemente de que tipo de ecuación se quiera aplicar, la información necesaria proviene de dos focos de trabajo, (i) Programación en estaciones de trabajo o recurso maquinaria, donde la información recopilada debe contener tiempos de setups de cada operación en cada estación de trabajo, tiempos de producción y tiempos de no producción y (ii) Relación de estimaciones o programación en variables del sistema, donde la información debe ser capturada desde el mismo desarrollo del proceso mediante monitoreo. Dado lo anterior, para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura, se tomará el primer foco (i), y para esto se aplica una de las técnicas favorables que permite su cálculo y análisis como es la simulación.

Figura 27. Estructura para la aplicación de métricas



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con [312], quien fue uno de los pioneros en brindar una definición aceptada y más difundida de la palabra de simulación, la define así:

“La simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo”.

Con relación a la complejidad, en esta definición es evidente que la simulación de sistemas complejos puede ayudar a entender mejor la operación del sistema, a detectar las variables más importantes que interactúan y a entender mejor las interrelaciones entre las ellas. Por otra parte, [313] menciona que la simulación en los sistemas de manufactura ha tenido tradicionalmente gran aceptación puesto que prácticamente todos los sectores industriales encuentran cabida para la aplicación de modelos de simulación como herramienta de apoyo en el proceso de toma de decisiones. Entre los sectores industriales de mayor aplicación se encuentran la industria automotriz, la fabricación de circuitos integrados, industria textil, alimentos, petroquímicas, la industria química, la fabricación de papel, industria metalurgia y la cadena logística global.

Cabe resaltar que a pesar que existe una mayor inclinación hacia métodos objetivos, analíticos y modelos matemáticos (ver tabla 11 y 13), gran parte de las investigaciones desarrollan este tipo de cálculos hacia lo estático y muy poco hacia lo dinámico. Debido a que la estimación o cuantificación de la información se debe desarrollar durante el tiempo de ejecución, por tanto, aplican las mediciones de tipo manual y con escenarios simples, siendo la situación real mucho más compleja. Es aquí donde radica el componente de innovación de este capítulo, por lo que los cálculos de medidas entrópicas de la complejidad se desarrollan con apoyo de los resultados obtenidos por medio de la simulación. Para simular aparecen unas series de técnicas como (i) La simulación de Montecarlo, que permite estudiar el comportamiento de un sistema a partir de la generación de variables aleatorias, números pseudoaleatorio y distribuciones de probabilidad y (ii) Soporte informático o programas de simulación, los cuales permiten conocer a profundidad el funcionamiento de un sistema de producción o escenarios propuestos. Para efectos de desarrollo de este capítulo se abordará esta última técnica, dado el alto número de escenarios, variables e indicadores. El programa utilizado es ProModel, ya que permite simular cualquier tipo de sistemas de fabricación, trabaja bajo Windows con una interfaz gráfica intuitiva y construcciones de modelado orientadas a objetos.

El primer paso en la construcción del modelo fue ingresar la información requerida en los módulos empleados: Locations, Entities, Processing, Arrivals, Attributes, Variables, General Information y Background Graphics [314]. Para plasmar la lógica del proceso de los programas se emplearon comando de programación y palabras reservadas del software que permitieron representar las características deseadas en cada modelo o escenario. En la figura 28 se evidencia la estructura del modelamiento H el cual es tomado de muestra.

Figura 28. Layout del modelo de simulación en ProModel – Escenario H



A partir de los resultados obtenidos y con la Ecuación 1, se calcula la complejidad estática (C_e), considerando la frecuencia observada (F_o), probabilidad (Pr) y entropía (E) de cada una de las estructuras. El modelamiento se desarrolló para las 256 posibles combinaciones, considerando una estructura de 24 horas y un break de 2 horas. Para un mayor entendimiento y análisis se ha tomado de ejemplo la última estructura del bloque 8 con ambiente H (ver tabla 31). Los cálculos evidencian una complejidad estática (C_e) igual a 1,983 bits.

Tabla 31. Resultados de la medición de la complejidad estática – ambiente H8

	Estación A			Estación B			Estación C			Ce
	Fo	Pr	E	Fo	Pr	E	Fo	Pr	E	
Locación 1	22	0,917	0,115	22	0,917	0,115	22	0,917	0,115	
Locación 2	22	0,917	0,115	22	0,917	0,115	22	0,917	0,115	
Break	4	0,167	0,430	4	0,167	0,430	4	0,167	0,430	
Total	48	2,000	0,661	48	2,000	0,661	48	2,000	0,661	

$$C_{estática}(Ce) = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} \log_2 P_{ij}$$

$$C_{estática}(Ce) = (0,115 + 0,115 + 0,430) + (0,115 + 0,115 + 0,430) + (0,115 + 0,115 + 0,430)$$

$$C_{estática}(Ce) = 1,983 \text{ bits}$$

Consecuente a esto, teniendo en cuenta la Ecuación 2 y los resultados obtenidos en la simulación, (ver anexo2) se calcula la complejidad dinámica (Cd). Considerando los porcentajes de Operación, Setup, Ocioso, Espera, Bloqueo y Down (ver tabla 32). Los cálculos evidencian un Cd igual a 7,4055 bits.

Tabla 32. Resultados de las locaciones de la simulación para las estaciones en estructura H8

		Operación	Setup	Ocioso	Espera	Bloqueo	Down
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Estación A	Locación 1	45,45	0,00	45,45	0,01	9,09	0,00
	Locación 2	45,45	0,00	34,65	10,81	9,09	0,00
Estación B	Locación 1	45,45	0,00	54,55	0,00	0,00	0,00
	Locación 2	45,38	0,00	44,77	9,85	0,00	0,00
Estación C	Locación 1	45,40	0,00	54,60	0,00	0,00	0,00
	Locación 2	45,30	0,00	54,70	0,00	0,00	0,00

$$C_{dinámica}(Cd) = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P'_{ij} \log_2 P'_{ij}$$

$$C_{dinámica}(Cd) = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [0,4545 * \log_2(0,4545)] + [0,4545 * \log_2(0,4545)] + [0,0001 * \log_2(0,0001)] + [0,0909 * \log_2(0,0909)] + [0,4545 * \log_2(0,4545)] + [0,3465 * \log_2(0,3465)] + [0,1081 * \log_2(0,1081)] + [0,0909 * \log_2(0,0909)] + [0,4545 * \log_2(0,4545)] + [0,5455 * \log_2(0,5455)] + [0,4538 * \log_2(0,4538)] + [0,4477 * \log_2(0,0985)] + [0,0985 * \log_2(0,0985)] + [0,4540 * \log_2(0,4540)] + [0,5460 * \log_2(0,5460)] + [0,4530 * \log_2(45,45)] + [0,5470 * \log_2(0,5470)]$$

$$C_{dinámica}(Cd) = 7,4055 \text{ bits}$$

De igual forma se pueden desarrollar los cálculos de la complejidad dinámica (Cd) teniendo en cuenta la Ecuación 3 y los resultados obtenidos en la simulación, Dado que el enfoque es orientado a las entidades a continuación en la tabla 33 se muestran los porcentajes correspondiente a la operación, en movimiento y bloqueo. Los cálculos evidencian un Cd igual a 7,782 bits.

Tabla 33. Resultados de las entidades de la simulación en estructura H8

Entidad	Operación (%)	Movimiento y espera (%)	Bloqueo (%)
Pieza	81,95	12,57	5,47

$$C_{dinamica}(Cd) = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P'_{ij} \log_2 P'_{ij} - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^Q \sum_{k=1}^q P'_{ijk} \log_2 P'_{ijk}$$

$$C_{dinamica}(Cd) = 7,4055 - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^Q \sum_{k=1}^q [0,1257 * \log_2(0,1257)]$$

$$C_{dinamica}(Cd) = 7,4055 + 0,3761 = 7,782 \text{ bits}$$

Teniendo en cuenta la Ecuación 4, de igual forma se pueden desarrollar los cálculos de la complejidad dinámica (Cd), considerando los resultados obtenidos en la tabla 32, cabe resaltar que solo se consideran dos estados de interés para cada recurso: En control (Ec) con color gris y Fuera de control (Fc) con color café. La tabla 34 se muestra los porcentajes correspondientes. Los cálculos evidencian un Cd igual a 5,9758 bits.

Tabla 34. Resultados de los estados de la simulación en estructura H8

		Operación (%)	Break (%)	Ocioso (%)	Espera (%)	Bloqueo (%)	Down (%)	Ec (%)	Fc (%)
Estación A	Locación 1	45,45	8,33	37,12	0,01	9,09	0,00	53,78	46,22
	Locación 2	45,45	8,33	26,32	10,81	9,09	0,00	53,78	46,22
Estación B	Locación 1	45,45	8,33	46,22	0,00	0,00	0,00	53,78	46,22
	Locación 2	45,38	8,33	36,44	9,85	0,00	0,00	53,71	46,39
Estación C	Locación 1	45,40	8,33	46,27	0,00	0,00	0,00	53,73	46,37
	Locación 2	45,30	8,33	46,37	0,00	0,00	0,00	53,63	46,47

$$C_{dinamica}(Cd) = - \sum_{i=1}^M (P_i \log_2 P_i + (1 - P_i) \log_2 (1 - P_i))$$

$$C_{dinamica}(Cd) = - \sum_{i=1}^M [(0,5378) * \log_2(0,5378)] + [0,4622 * \log_2(0,4622)]$$

$$+ [(0,5378) * \log_2(0,5378)] + [0,4622 * \log_2(0,4622)] + [(0,5378) * \log_2(0,5378)]$$

$$+ [0,4622 * \log_2(0,4622)] + [(0,5371) * \log_2(0,5371)] + [0,4629 * \log_2(0,4629)]$$

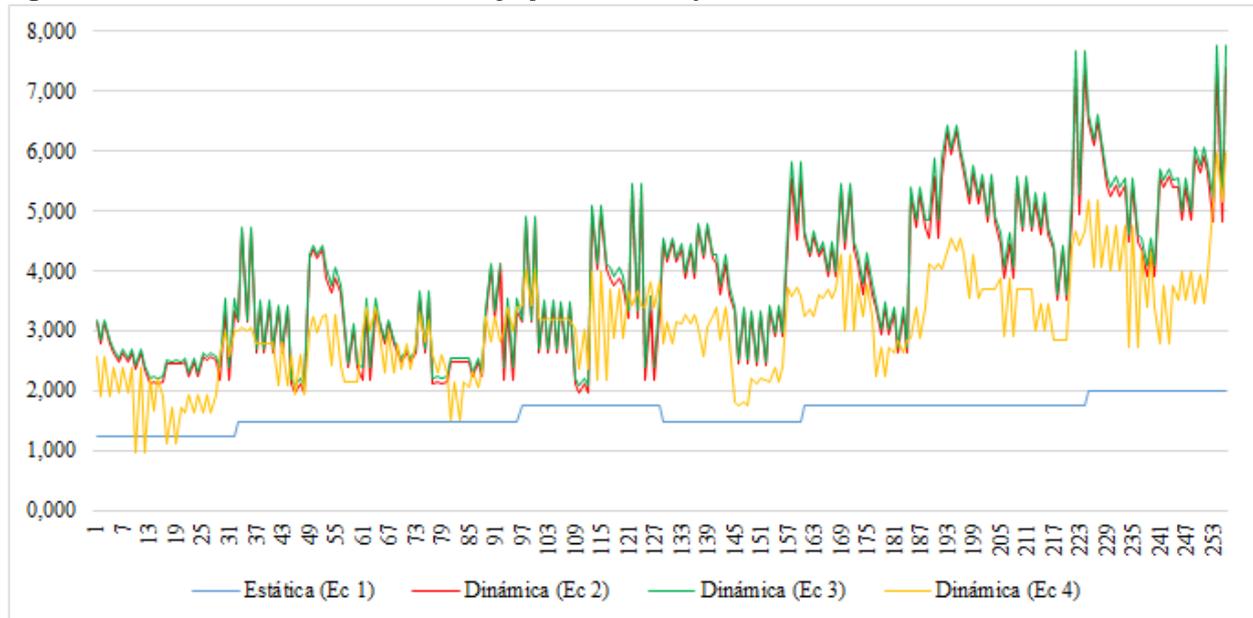
$$+ [(0,5373) * \log_2(0,5373)] + [0,4627 * \log_2(0,4627)] + [(0,5363) * \log_2(0,5363)]$$

$$+ [0,4637 * \log_2(0,4637)]$$

$$C_{dinámica}(Cd) = 5,9758 \text{ bits}$$

En la figura 29 se muestran los resultados obtenidos en el cálculo de la Cs y de las diversas Cd de todas las estructuras modeladas. Es evidente que a mayor amplitud en los ambientes como por ejemplo los de tipo H, representa un mayor Cs y Cd.

Figura 29. Resultados del cálculo de complejidad estática y dinámica



5.6 Análisis estadístico experimental y factorial

De acuerdo con [315], en la obtención de un modelo a partir de un sistema existente, se debe considerar tres (3) aspectos importantes (i) la determinación del diseño estructural, que está asociado a la configuración de la planta, (ii) La información y datos suministrados a partir de las partes entrantes (Arribos) y del desarrollo de las actividades en cada una de las etapas (Tiempos de operación) y (iii) Los resultados que se buscan lograr u obtener, que están asociados a medidas de tiempo, cantidad, eficiencia, espacio, costos y productividad; y que pertenecen a los objetivos o metas que se deseen.

Dado lo anterior y a partir de lo abordado en el apartado 3.4 y tabla 19, una vez identificados los posibles factores que influyen de manera significativa en las características asociadas con la variable respuesta complejidad y de acuerdo al objetivo propuesto, se formulan de manera específicas varias hipótesis, que parten de lo previsto en el ítems 5.2. A continuación se desglosan cada una de ellas:

- **H₆₀(A):** El efecto del factor diseño estructural es igual cuando se comparan distintas estructuras de ambientes flow shop (FS) e Híbrido (H)
- **H₆₁(A):** El efecto del factor diseño estructural es diferente cuando se comparan distintas estructuras de ambientes Flow Shop (FS) e Híbrido (H)

- **H₆₀(B):** El efecto del factor variación de tiempo por etapa es igual cuando se comparan distintos niveles de tiempo
- **H₆₁(B):** El efecto del factor variación de tiempo por etapa es diferente cuando se comparan distintos niveles de tiempo
- **H₆₀(C):** El efecto del factor variación de las frecuencias de llegada es igual cuando se comparan distintos niveles de frecuencia
- **H₆₁(C):** El efecto del factor variación de las frecuencias de llegada es diferente cuando se comparan distintos niveles de frecuencia
- **H₆₀(D):** El efecto del factor variación en las cantidades de arribos de las entidades es igual cuando se comparan distintos niveles de cantidades
- **H₆₁(D):** El efecto del factor variación en las cantidades de arribos de las entidades es igual cuando se comparan distintos niveles de cantidades

De igual forma, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los indicadores de desempeño de cada uno de los sistemas estructurales, como (i) Productos terminados, (ii) Tiempo de ciclo, (iii) Productos en procesos, (iv) Throughput, (v) Productividad, (vi) eficiencia y (vii) Costo de producción. Con respecto a la medición de la complejidad, se plantea la siguiente hipótesis:

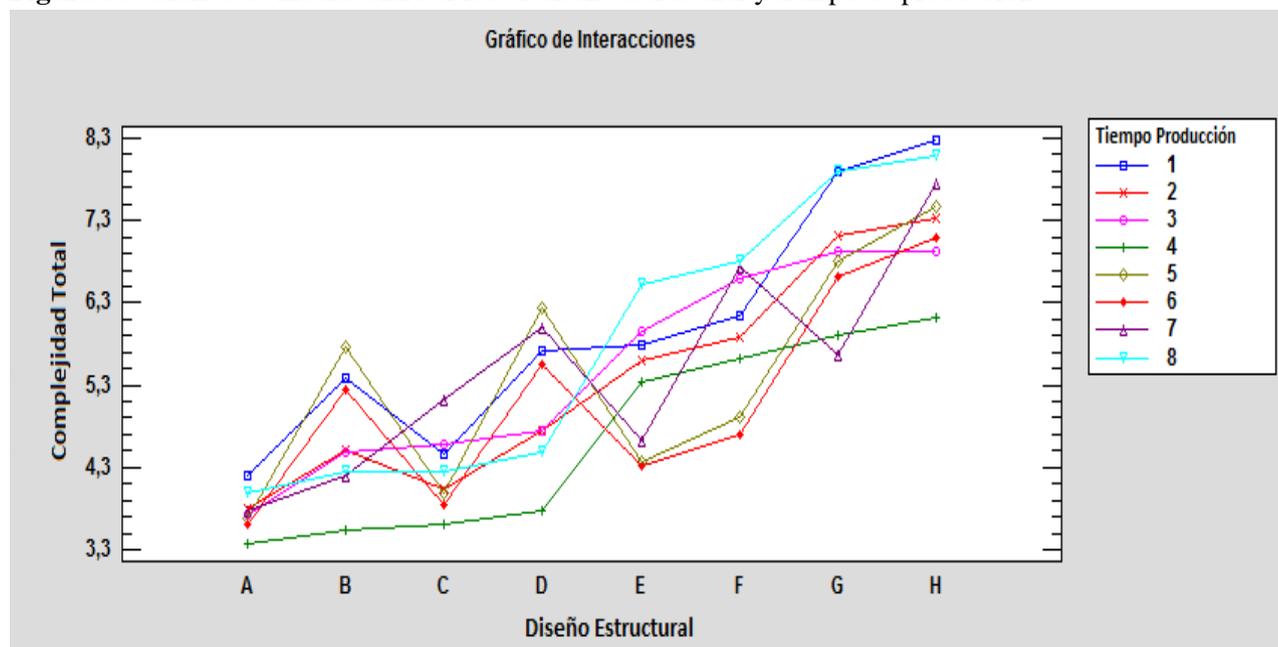
- **H₇₀(A):** Los indicadores de desempeño plateados no se encuentran correlacionados con respecto a la medida de complejidad total del sistema
- **H₇₁(A):** Los indicadores de desempeño plateados se encuentran correlacionados con respecto a la medida de complejidad total del sistema
- **H₇₀(B):** Los indicadores de desempeño plateados no se encuentran correlacionados con respecto a la medida de complejidad estática del sistema
- **H₇₁(B):** Los indicadores de desempeño plateados se encuentran correlacionados con respecto a la medida de complejidad estática del sistema
- **H₇₀(C):** Los indicadores de desempeño plateados no se encuentran correlacionados con respecto a la medida de complejidad dinámica del sistema
- **H₇₁(C):** Los indicadores de desempeño plateados se encuentran correlacionados con respecto a la medida de complejidad dinámica del sistema

Se utilizó la técnica diseño de experimentos para determinar el nivel de significancia que tienen los factores por medio de un análisis de varianzas o tabla de anova. En la tabla 35, se puede apreciar que los factores diseño estructural y tiempo de producción por etapa, presentan un p-valor menor que 0,05, tanto en los efectos principales como en las interacciones; por lo que se rechazan las hipótesis nula – H₆₀(A) y H₆₀(B). Caso contrario sucede con los factores tiempo de arribos y cantidad de arribos, que presentan un p-valor mayor que 0,05; por lo que se aceptan las hipótesis nula – H₆₀(C) y H₆₀(D). Dado lo anterior se puede inferir que los factores A y B influyen significativamente sobre complejidad total en los sistemas de manufactura, con un 95% de nivel de confianza.

Tabla 35. Resultado del análisis de varianza – Anova para la complejidad total

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Diseño estructural	349,261	7	49,8945	488,74	0,0000
B: Tiempo de operación	36,0067	7	5,14382	50,39	0,0000
C: Tiempo de arribos	0	1	0	0,00	1,0000
D: Cantidad de arribos	0,122063	1	0,122063	1,20	0,2758
INTERACCIONES					
AB	75,4261	49	1,53931	15,08	0,0000
AC	0	7	0	0,00	1,0000
AD	8,20386	7	1,17198	11,48	0,0000
BC	0	7	0	0,00	1,0000
BD	21,0011	7	3,00016	29,39	0,0000
CD	0	1	0	0,00	1,0000
RESIDUOS	16,4361	161	0,102087		
TOTAL (CORREGIDO)	506,457	255			

Un análisis de gráficas por medio del software Statgraphics Centurión v19, permite comparar los diferentes niveles de los factores con respecto a la variable complejidad total. En cuanto al factor diseño estructural, los resultados indican que existe diferencia significativa cuando se comparan los tipos de estructuras, siendo A, B y C los que generan menor complejidad total y F, G y H los de mayor complejidad total (ver figura 30). Dado lo anterior se puede inferir que a mayor cantidad del número de máquinas en las distintas etapas, mayor será la complejidad total.

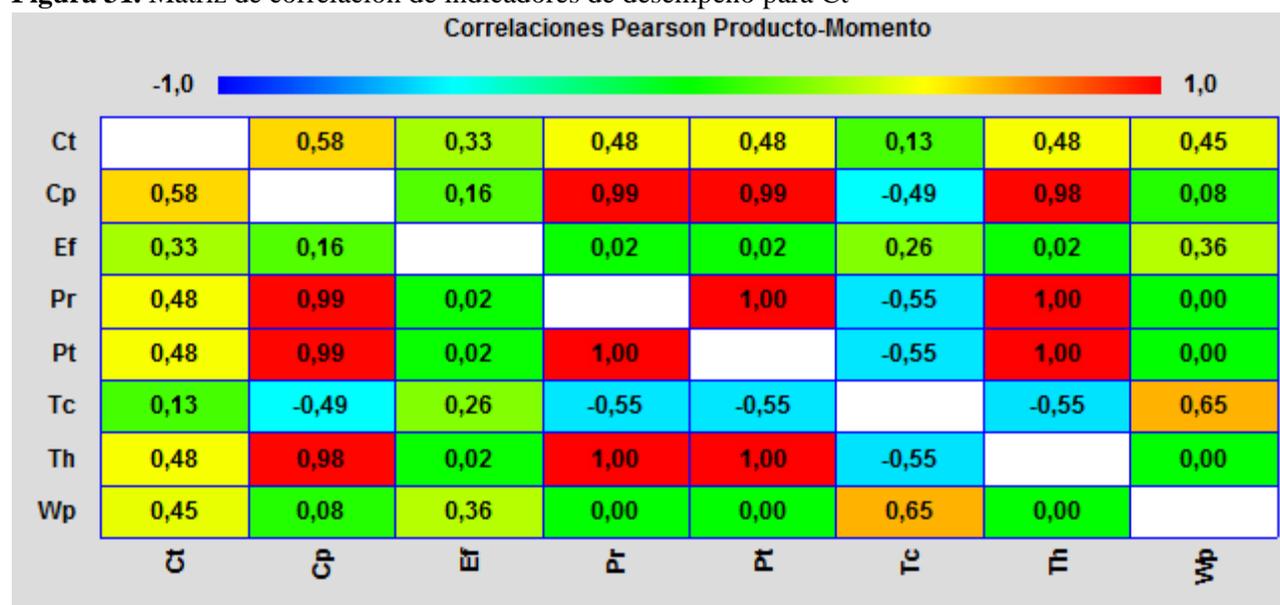
Figura 30. Gráfica de medias entre el factor diseño estructural y tiempo de producción

En cuanto al factor tiempo de producción por etapas, los resultados obtenidos indican que existe diferencia significativa cuando se compara la variación de los tiempos por etapas. Siendo la estructura tipo 4 la que genera menor complejidad total (ver figura 30). Dado lo anterior se puede inferir que

cuando los tiempos varían en forma progresiva de mayor a menor se genera una menor complejidad total. Finalmente se verificaron los supuestos del modelo, teniendo en cuenta las pruebas de normalidad, homogeneidad de las varianzas y la independencia de los datos. Los cuales dejan entre ver dichos cumplimientos.

Consecuentemente, se desarrolla un análisis factorial, para encontrar correlaciones entre las variables. A partir de una matriz se ubican las correlaciones entre todas las variables consideradas (Indicadores de desempeño) con respecto a la complejidad total (ver figura 31). Esta gráfica muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. Los siguientes pares de variables tienen un p-valor por debajo de 0,05 con un nivel de confianza del 95%, indicando correlaciones significativamente diferentes de cero. Por lo que se aprueba la hipótesis alternativa $H_{71}(A)$ que establece que los indicadores de desempeño planteados se encuentran correlacionados con respecto a la medida de complejidad total del sistema, con mayor fuerza respecto a los costos de producción (Cp).

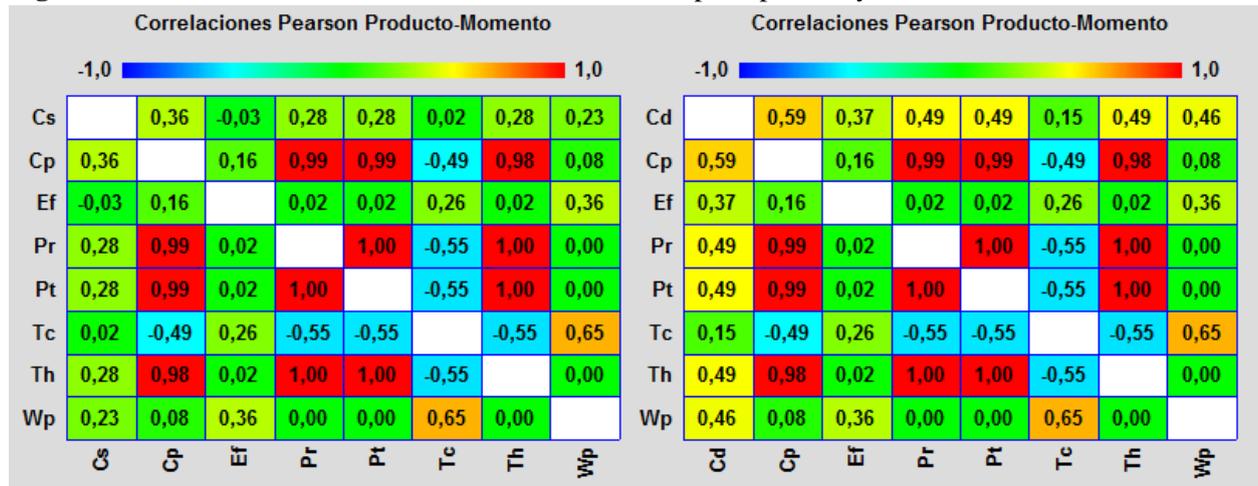
Figura 31. Matriz de correlación de indicadores de desempeño para Ct



Con respecto a la complejidad estática (Cs) se aplica la misma prueba, en la figura 32 se evidencia que las variables Tc y Ef no se correlacionan con respecto a la medida de complejidad estática, por lo que se aprueba la hipótesis nula $H_{70}(B)$. A diferencia de las variables Ct, Pr, Pt, Th y Wp; quienes tienen una correlación con la medida de complejidad estática, corroborando con un nivel de confianza del 95% la hipótesis alternativa $H_{71}(B)$.

En relación a la complejidad dinámica (Cd), la matriz de correlación indica que todos los indicadores de desempeño planteados se encuentran correlacionados con respecto a la medida de complejidad dinámica del sistema (ver figura 32), con mayor fuerza respecto a los costos de producción (Cp). Por tanto se corrobora con un nivel de confianza del 95% la hipótesis alternativa $H_{71}(C)$.

Figura 32. Matriz de correlación de indicadores de desempeño para Cs y Cd



5.7 Conclusiones del capítulo

Esta investigación se centra en la medición de la complejidad estática, dinámica y total, basados en el método de la entropía de Shannon, considerando diferentes estructuras y factores en un ambiente tipo flow shop e híbrido. Se desarrolla inicialmente el modelamiento estructural teniendo en cuenta 256 posibles combinaciones en una configuración de tres etapas y como máximo dos máquinas en cada una. Permitiendo un análisis respecto a los indicadores de desempeño, estadístico experimental y factorial. Los resultados obtenidos corroboran las hipótesis planteadas, donde estadísticamente los factores diseño estructural y la variación del tiempo de producción por etapa, influyen significativamente en la variable respuesta. Infiriendo que a mayor cantidad del número de máquinas en las distintas etapas, mayor será la complejidad total. A su vez cuando los tiempos varían en forma progresiva de mayor a menor se genera una menor complejidad total. De igual forma se evidencia la existencia de correlación entre los indicadores y la variable estudiada, en el que sobresale la incidencia con los costos de producción.

Capítulo 6

Modelo conceptual y métrica para la medición de la complejidad en sistema de manufactura

6.1 Objetivo

- **(OE4)**- Diseñar un modelo conceptual y métrica para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura, que sirva de apoyo a la aplicación de modelos matemáticos y a los tomadores de decisiones para un mayor entendimiento procedimental.

6.2 Hipótesis

Partiendo de lo anterior, se formulan dos (2) hipótesis, que justifican la necesidad de diseñar y proponer un modelo de tipo conceptual para una adecuada medición de la complejidad en sistemas de manufactura:

- **(H8)**- El diseño de un modelo conceptual para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura, sirve de apoyo y garantiza un mayor entendimiento y comprensión.
- **(H9)**- Los resultados obtenidos por medio del método cualitativo y subjetivo en torno a la complejidad del sistema, están alineados con los resultados finales del método cuantitativo objetivo.

6.3 Introducción

Existen distintos modelos que se soportan entre sí para medir la complejidad, entre estos se encuentran los modelos conceptuales, modelos teóricos y modelos matemáticos. La utilización de estos dentro de la actividad industrial permite un mayor estudio, análisis y comprensión del comportamiento del sistema. En este capítulo se abordará una propuesta de modelo conceptual mediante el cual se determinan los aspectos fundamentales para la medición de complejidad en sistemas de manufactura.

Los modelos conceptuales han resultado ser una técnica que, desde un punto de vista de la transmisión de una idea o representación de ésta, facilita la elaboración de una estructura coherente para apoyar la visualización y el entendimiento de un proceso. Según [316] un modelo conceptual, es un modelo que sirve de guía o ayuda en el proceso de modelado de una realidad concreta y específica. De igual forma [317] establecen que los modelos conceptuales consisten en herramientas descriptivas, que subrayan los aspectos principales y las variables relevantes implicadas en un problema específico, o estructuras empíricas que proponen directrices dentro de un sistema de manufactura y de cadenas de suministros.

6.4 Consideraciones para el diseño del modelo conceptual

Partiendo del abordaje de los capítulos anteriores, las siguientes consideraciones fueron necesarias para la construcción o diseño del modelo conceptual como propuesta para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura:

- Abordaje débil hacia elementos del sistema de manufactura como la planificación y programación de la producción, el volumen de producción y las características estructurales asociadas a las personas, producto y planta (ver figura 8).
- Tendencia alta hacia mediciones de la complejidad estática y una baja proyección hacia la complejidad dinámica (ver figura 8).
- Entre los enfoques que contemplan (i) la complejidad estática y dinámica, (ii) Aplicables para modelos discretos, (iii) Analizan modelos estocásticos, (iv) Desarrollan una perspectiva analítica, (v) Reducen el grado de incertidumbre y (vi) Ayudan a comprender el sistema. Se destacan los de Teoría de la información (IT), Índice cuantitativo (QI), Otros tipos de enfoques (OA) e Híbridos (H), (ver tabla 11).
- Considerando los métodos del enfoque de Teoría de la información (IT), el menos abordado es Entropía de Shannon (SE) y E-Machines (EM), (ver tabla 9). Siendo el más favorable el primero, dada su aplicabilidad en entornos generales o sistemáticos.
- Teniendo en cuenta los métodos desde el punto de vista de Otros enfoques (OA), sobresalen los de tipo Cuestionarios (Q) como los de mayor aplicabilidad o uso por los investigadores (ver tabla 10).
- Considerando los métodos del enfoque de Índice cuantitativo (QI), el más favorable es Índice de complejidad (CXI), dado que el único de tipo cualitativo y que emplea la técnica anterior descrita como los Cuestionarios (Q), (ver tabla 11)
- Mayor inclinación hacia métodos objetivos, analíticos y modelos matemáticos (ver tabla 11 y 13), fundamentados en técnicas de optimización, algoritmos y simulación de procesos.
- Efecto positivo en cada uno de los subsectores de manufactura y elementos del sistema destacando el elemento personas, seguido del producto, luego el proceso, la planificación y finalmente la planta (ver tabla 18).
- Alto número de factores que generan complejidad desde un ámbito interno en el sector de manufactura, agrupados según el tipo sea estática o dinámica (ver tabla 19).
- La no existencia de diferencias significativas al comparar al comparar los subsectores económicos, así como con los tipos de operación (MTO) y (MTS) y que ambos generan una alta complejidad (ver figura 22).
- El tipo de proceso (FS) tiene un mayor impacto en la complejidad, comparado con comparar el (JS) y el (PR), (ver figura 22).
- La importancia de la simulación en la medición de la complejidad de sistemas de manufactura (ver apartado 5.5). Debido a la estimación o cuantificación de la información necesaria para el cálculo de la complejidad dinámica, ya que se necesita desarrollar durante el tiempo de ejecución.
- La identificación de inconvenientes o deficiencias en las métricas clásicas y extendidas.

6.5 Modelo conceptual

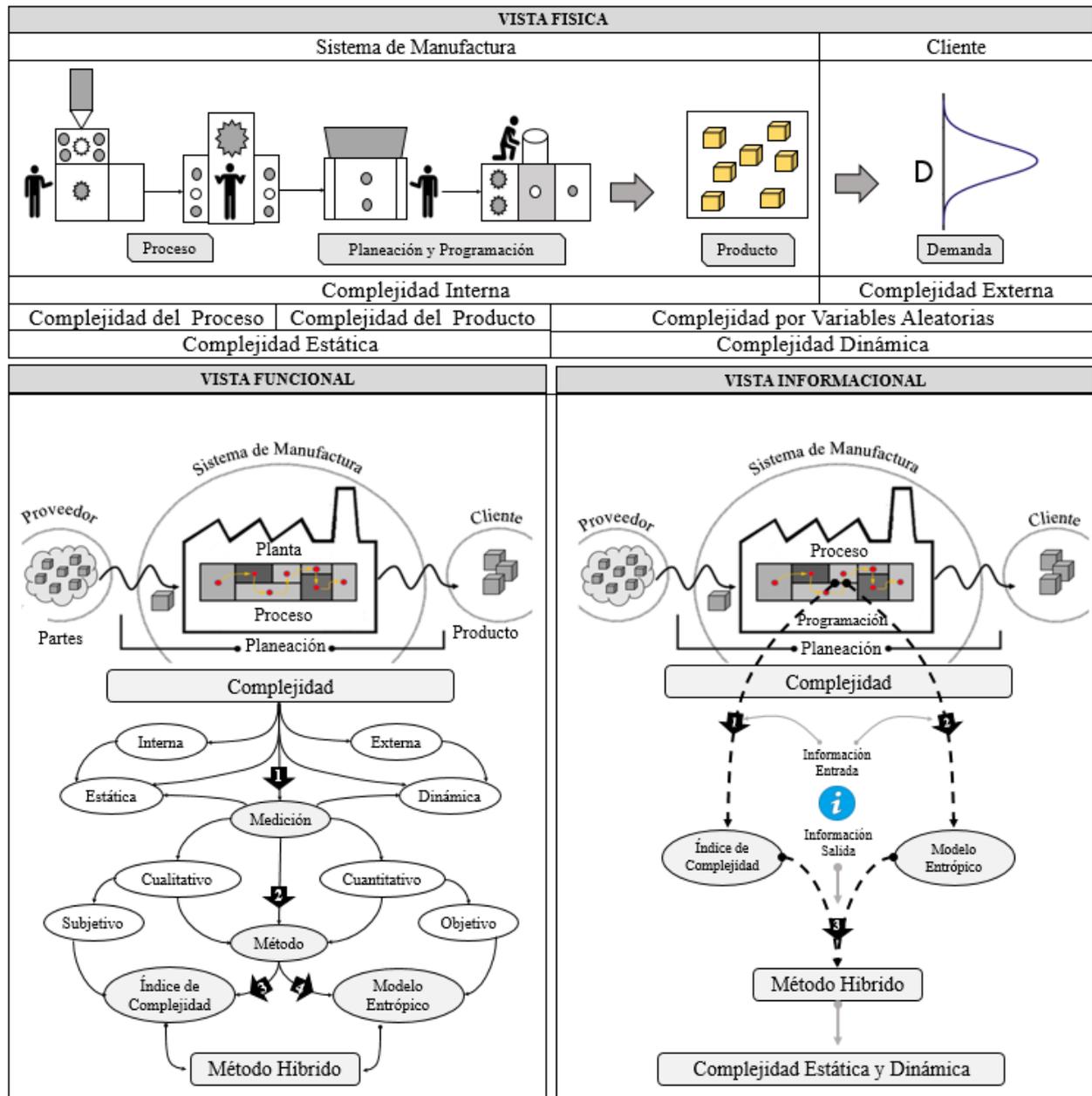
La construcción de un modelo conceptual permite tener una amplia visión de lo que se quiere modelar y proporciona un mayor entendimiento del sistema estudiado. En este sentido, bajo el contexto empresarial, [318] establecen que para su diseño es necesario involucrar los agentes participantes y las áreas comprometidas de manera que se facilite su representación, entendimiento y análisis posterior. De igual manera, [319] proponen que un modelo conceptual debe involucrar las interacciones que existen entre los elementos que lo conforman, teniendo en cuenta los flujos de información, documentos y recursos. En este sentido, un modelo conceptual puede utilizarse como modelo de referencia para la construcción de nuevos modelos específicos. De hecho, [25] consideran el modelo conceptual como una herramienta de soporte para el modelado analítico o matemático. Desde la óptica de los tipos de complejidad en sistemas de manufactura, sobresalen los modelos conceptuales (i) De tipo global desarrollados por [320] quienes proponen una estructura que permita el cumplimiento de las metas propuestas a partir de escenarios agresivos, consecuente a esto [22] plantean un modelo que permita medir y analizar el impacto negativo de la complejidad en sistemas de manufactura.

A su vez [3] proponen un modelo que permita determinar la importancia de los factores que influyen en los indicadores de producción. (ii) De tipo estática, donde [100] Definen una estructura metodológica para líneas de ensamble en cadenas de suministros, por otro lado [101] establecen un modelo para la medición la complejidad de la producción desde el punto de vista específico por estación de trabajo. (iii) De tipo dinámica desarrollado por [321] quienes aplican un modelo que permita una mayor comprensión entre las relaciones de los agentes en una cadena, a partir de la medición de la complejidad en entornos de difícil adaptabilidad. En general, se puede afirmar que el modelamiento de sistemas requiere de datos detallados, lo que genera una diversidad de información dificultando el entendimiento, comprensión y utilización [4]. De esta forma, un modelo conceptual para el modelado de sistemas de producción y cadenas de suministros, debería contener un conjunto de conceptos organizados e interrelacionados que ayudasen a construir un modelo concreto de un proceso. Por ello, se considera fundamentalmente que se visionen diferentes perspectivas como funcional, informacional y decisional [316][317]. Basado en estos estudios y en las investigaciones exploratorias realizadas, los hallazgos encontrados dan respuesta a la hipótesis planteada (H8), en las que se corrobora que los modelos conceptuales sirven de apoyo y garantizan un mayor entendimiento y comprensión para la medición de la complejidad en un sistema de manufactura. Dado lo anterior, en la figura 33 se presenta el diseño de un modelo conceptual, considerando lo descrito en el apartado (6.4) y estructurado en tres perspectivas o vistas, para facilitar su comprensión y uso.

6.5.1 Modelo conceptual - Vista física

La vista física muestra cómo se integran los diferentes recursos y flujos que forman parte de un sistema de fabricación. Para su elaboración es imprescindible tener claridad sobre las entradas, salidas, ubicaciones, modos de operación y transporte [318]. Para su construcción se deben considerar todos los elementos relacionados, con el fin de buscar un propósito único; están vinculados a las instalaciones, el proceso, el producto y la planificación.

Figura 33. Propuesta de modelo conceptual



Fuente: Elaboración propia

Según [319], deben tenerse en cuenta fuentes internas como el tipo de operación y la estabilidad del programa de producción, así como fuentes externas como las variaciones de la demanda [25]. Según [320], la complejidad depende de la variedad de un producto, la estructura de un proceso y su variabilidad en el tiempo. Teniendo en cuenta lo anterior, surgen dos tipos de complejidades, la complejidad interna, que está asociada a los flujos dentro del fabricante, y la que puede ser causada por factores externos a la organización llamada complejidad externa, que está asociada a variables, agentes y flujos externos. Según la evolución del tiempo y su comportamiento, para [3] la complejidad en los sistemas de fabricación puede ser estática o dinámica. La complejidad estática se refiere a una característica que puede asociarse a los sistemas y también a los procesos de producción, estudia la parte estructural o el diseño del sistema [99][100][101], y las variables no

cambian con el tiempo [321]. A diferencia de la complejidad dinámica que se refiere a los cambios de las variables relevantes del proceso en un horizonte temporal, según [321] las variables evolucionan con respecto al tiempo y estudian la incertidumbre en el comportamiento de esas operaciones [99][100][101]. Dado lo anterior en la figura 33, se evidencia la construcción del modelo conceptual con visión física para la medición de la complejidad en los sistemas de manufactura.

6.5.2 Modelo conceptual - Vista funcional

Inicialmente se debe abordar un caso estudio de la industria manufacturera, que permita caracterizar el sistema productivo e identificar los elementos asociados a la planta, el proceso, el producto, las piezas y la planificación. La información se recoge mediante visitas de campo, observación directa y entrevistas. El desarrollo de esta sección facilita el uso de diagramas de flujo, Proveedor-Entradas-Proceso-Salidas-Clientes (SIPOC) o Mapeo del Flujo de Valor (VSM), (ver figura 33). En esta vista se identifica un primer punto donde existen diversas variables como el origen, la cantidad, la variedad, el tiempo y las relaciones del sistema, consecuente con esto un segundo punto que establece que para medir la complejidad en los sistemas de manufactura, existen métodos cualitativos que dependen de la percepción de las personas involucradas en el proceso y métodos cuantitativos basados en datos, verificación y análisis. A partir de esto, se diversifican dos métodos y se procede a la unión para conformar un método híbrido, A continuación se describen cada uno de ellos:

- **Índice de Complejidad (CXI):** Mide la complejidad desde una perspectiva subjetiva, ya que depende de la opinión de los responsables de cada puesto de trabajo. Para su implementación se necesita de un cuestionario estructurado con escalas Likert, compuesto por preguntas con niveles de 1 a 5, donde uno es "completamente de acuerdo" y cinco "desacuerdo en absoluto". Las preguntas se agrupan en seis áreas problemáticas, tomadas de datos empíricos obtenidos de [4], entre estos se encuentran: (i) Referencia de productos, (ii) Contenido de trabajo, (iii) Diseño de planta, (iv) Herramientas de apoyo, (v) Instrucciones de trabajo y (vi) Vista generalizada. Finalmente los resultados obtenidos son analizados matemáticamente, la ecuación 8 mide la complejidad de cada área problemática y la Ecuación 9 mide la complejidad total de cada estación.

$$CXI_e = \frac{\sum_{p=1}^n M_{ep}}{n} \quad (8)$$

$$CXI = \frac{\sum_{e=1}^k CXI_e}{k} + \frac{\max_{e=1...k} CXI_e}{4} \quad (9)$$

Donde:

CXI es el índice de complejidad total

CXI_e es el índice de complejidad por criterio evaluado

M_{ep} es la medida de tendencia central (mediana)

k es el número de criterios evaluados

n es el número de encuestas realizadas

Para el análisis las puntuaciones obtenidas, se categorizan de acuerdo al nivel alcanzado. Según [44] los límites son: Verde para $CXI < 2$ (No se necesita ningún cambio), amarillo para $2 \leq CXI < 3$ (Necesita un cambio), y rojo para $CXI \geq 3$ (Necesita cambio urgente).

- **Nueva Métrica para la Medición Entrópica:**

La propuesta para la medición entrópica, se basa en ecuaciones analíticas que facilitan el análisis entrópico en diferentes tipos de escenarios y proporcionan un soporte cuantitativo para la toma de decisiones. Es una técnica objetiva, que permite medir la complejidad tanto estática como dinámica. Se fundamenta en planteamientos desarrollados desde la teoría de la información definida por [210] y llevada a entornos empresariales por [99][129] y que en la actualidad son denotadas como métricas clásicas. Siendo declaradas en la Ecuación 1 que mide la complejidad estática en sistemas de manufactura y las Ecuaciones 2,3 y 4 que mide la complejidad dinámica desde distintas perspectivas. Adicional a esto, también se toma de referencia la métrica planteada por [97] quien desarrolla una extensión de las métricas clásicas. Siendo declaradas en las Ecuaciones 5 y 6 (ver figura 27). La tabla 36 relaciona las distintas aplicaciones y evaluaciones de estas métricas durante los últimos años recientes, siendo evidente la utilización por parte de la comunidad investigativa.

Tabla 36. Relación de autores y métrica clásica y extendida

Autores	Métrica		Aplicación y evaluación
	Clásica	Extendida	
Zuzana et al. (2019) [156]	•		Complejidad estática en ambientes Job shop
Gomes et al. (2019) [159]; Kavilal et al. (2018) [168]; Hamta et al. (2018) [169]; De Paiva et al. (2017) [322]	•		Complejidad estática, cantidad de conexiones
Kavilal et al. (2018) [168]; Modrak & Soltysova (2018) [160]; Guoliang et al. (2017) [170]; Modrak & Soltysova (2017) [110]	•		Complejidad estática considerando cantidad de partes, productos y máquinas y operaciones.
Xiaoxiao & Zikui (2019) [323]		•	Variaciones en el tiempo de operación
Ucenic & Ratiu (2018) [324]		•	Variaciones en el flujo de materiales

Fuente: Elaboración propia

Un estudio y análisis a profundidad, permitió identificar algunas características, inconvenientes o deficiencias en cada una de estas métricas, (i) para el caso de las clásicas, no evidencian cambios representativos en las variaciones de frecuencias de cada intervalo, lo que genera igualdad de valores de probabilidad y de entropía. (ii) en la métrica extendida, presenta deficiencia cuando existen desequilibrios de amplitud en los errores en escala positiva y negativa, adicional a esto, los casos de aplicación han sido efectuados para

análisis de aleatoriedad en cadenas de suministros y ausencia en elementos del sistema de manufactura.

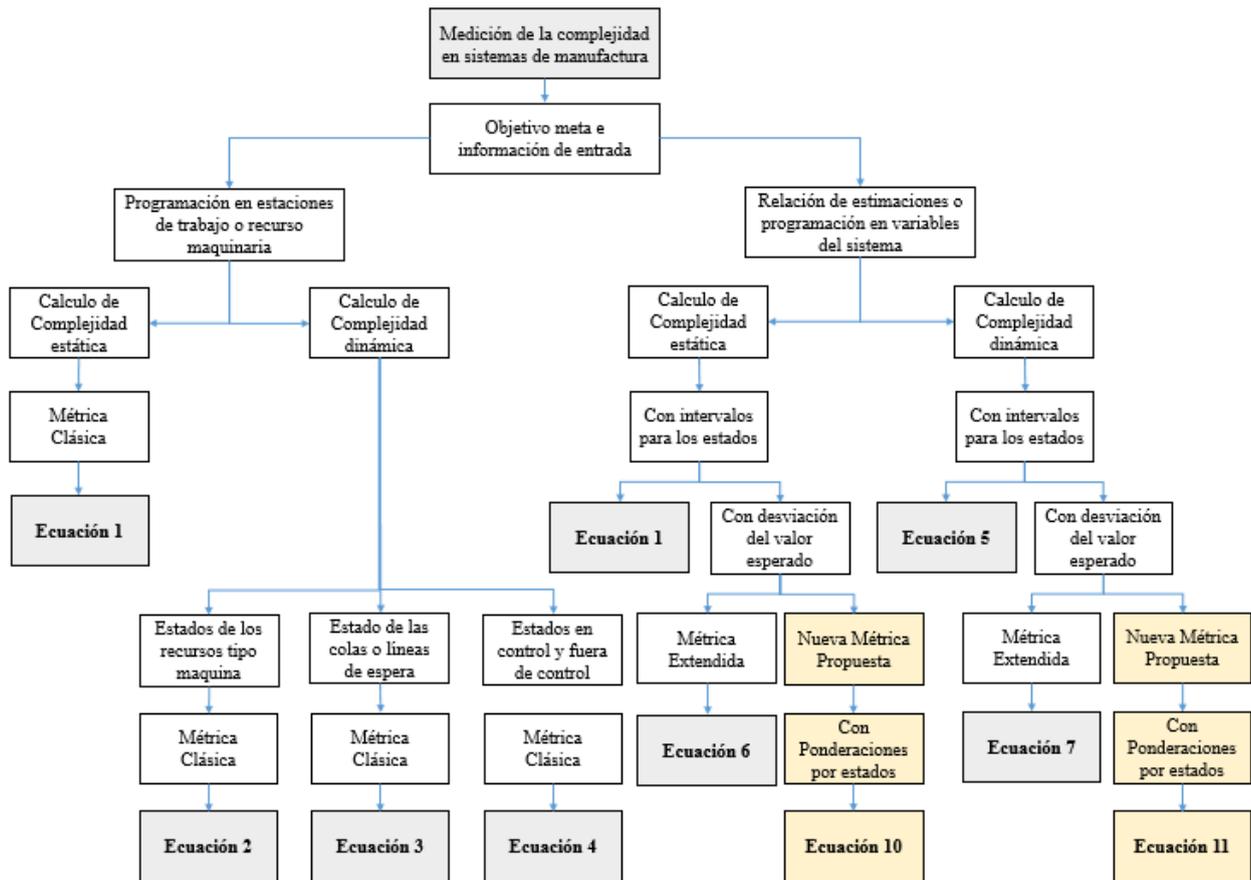
A partir de esto se propone una nueva forma de medir entrópicamente la complejidad en sistemas de manufactura, haciendo consideración de (i) La determinación de niveles y amplitud de clases de forma cuantitativa dependiendo de la cantidad de datos, (ii) Cálculo de ponderaciones (W_{ij}) dependiendo de la cantidad de intervalos y (iii) Asignación de ponderaciones teniendo en cuenta que entre más alejado este del estado de control, mayor será la desviación y por ende mayor peso (ver tabla 37).

Tabla 37. Comparación de características respecto al nuevo método

Características	Clásico	Extendido	Nueva
Se tienen en cuenta las probabilidades de las frecuencias de cada intervalo (P_{ij}).	•	•	•
Se evidencias cambios representativos en las variaciones de frecuencias de cada intervalo.		•	•
Se presentan distintos valores de probabilidad en el cálculo de la entropía.		•	•
El cálculo del error es a partir de la diferencia normal entre lo real con lo previsto		•	
El cálculo del error es a partir de las desviaciones absolutas porcentuales.			•
Se evidencian cambios en los intervalos debido al cálculo del valor promedio de las desviaciones de forma absoluta (d_{ij}).		•	•
Considera por medio de escala categórica los estados bajo de control y fuera de control		•	
Considera por medio de métodos cuantitativos los estados bajo de control y fuera de control.			•
El cálculo de la desviación absoluta porcentual opera sin ningún problema cuando existen desequilibrios en los errores.			•
Es deficiente cuando existen desequilibrios de amplitud en los errores por encima (positivos) y por debajo (negativos).		•	
Considera cálculo de ponderaciones (W_{ij}), asignando mayor peso al intervalo más alejado del estado de control.			•

Teniendo en cuenta la figura 27, se desarrolla una ampliación, de manera que permita entender estructuralmente y en detalle el aporte de la nueva métrica planteada (ver figura 34).

Figura 34. Estructura para la aplicación de nueva métrica propuesta



Fuente: Elaboración propia

Dado lo anterior, se formulan las ecuaciones 10 y 11, las cuales representan las nuevas métricas propuestas para la medición entrópica de la complejidad en sistemas de manufactura, solventando las deficiencias anteriores por medio de la agregación de ponderaciones (W_{ij}) por estados y niveles.

$$C_{estática}(Ce) = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\log_2 P_{ij}] W_{ij} d_{ij} P_{ij} \quad (10)$$

$$C_{dinámica}(Cd) = -(1 - P) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\log_2 P_{ij}] W_{ij} d_{ij} P_{ij} \quad (11)$$

Donde:

P: Probabilidad en el estado de control

(1-P): Probabilidad en estado fuera de control

P_{ij} : Probabilidad de estado de un recurso dado

W_{ij} : Es el peso ponderado para cada uno de los intervalos

dij: Es la desviación absoluta de los resultados esperados para el estado

M: Cantidad de recursos

N: Número de estados posibles

A continuación se crea un ejemplo comparativo a partir del caso de estudio abordado por Isik (2010) [97] el cual toma los valores de la demanda real y prevista en un periodo de tiempo mensual, para medir la complejidad basada en la entropía en la fabricación.

Tabla 38. Determinación de las desviaciones absolutas de cada periodo

Tiempo (Meses)	Variable Demanda		Desviación Porcentual Absoluta
	Actual	Prevista	
1	20	23	15,0
2	25	25	0,0
3	21	20	4,8
4	23	15	34,8
5	30	35	16,7
6	32	36	12,5
7	34	30	11,8
8	40	31	22,5
9	44	37	15,9
10	35	35	0,0
11	33	36	9,1
12	30	22	26,7
13	23	23	0,0
14	24	27	12,5
15	21	14	33,3
16	22	24	9,1
17	33	27	18,2
18	38	32	15,8
19	37	37	0,0
20	33	37	12,1

Se especifican seis (6) pasos: (i) Primer paso: se calculan las desviaciones absolutas de cada uno de los periodos, que no es más que la diferencia entre los valores actuales y previstos en forma absoluta, dividido entre el valor actual (ver tabla 38). (ii) Segundo paso: se calcula el parámetro estadístico de dispersión asociado al rango, se definen los intervalos y se calcula la amplitud de cada intervalo.

Desviación porcentual absoluta

$$DPA = \left[\frac{(|\text{Valor actual} - \text{Valor Estimado}|)}{\text{Valor Actual}} \right] * 100$$

$$DPA_1 = \left[\frac{(|20 - 23|)}{20} \right] * 100 = 15,0$$

Rango o recorrido de la variable

Rango (R) = Valor Máximo - Valor Mínimo

Rango (R) = 34,8 – 0,0

Rango (R) = 34,8

Intervalos

Intervalos (K) = Raíz cuadrada del número de datos – Una unidad (1)

Esta diferencia se hace necesaria debido a que el primer intervalo por defecto es cero (0) lo que representa que los estados están controlados.

Intervalos (K) = $(\sqrt{20}) - 1$

Intervalos (K) = 4,47 \approx 5

Amplitud de cada intervalo

Amplitud (C) = Rango (R) / Intervalos (K)

Amplitud (C) = 34,8 / 5

Amplitud (C) = 6,957

Consecuentemente, el (iii) Tercer paso: consiste en clasificar los datos de las desviaciones absolutas dentro de los intervalos denotados como frecuencias y se calculan las probabilidades (Pij). Como (iv) Cuarto paso: se calcula la desviación promedio del valor esperado (dij) (ver tabla 39).

Tabla 39. Cálculo de las probabilidades Pij y las desviaciones promedio dij

Intervalo		Frecuencia	Pij		dij	
0,000		4	4/20	0,20	(0+0+0+0)/4	0,00
0,001	6,958	1	1/20	0,05	(4,8)/1	4,76
6,958	13,914	6	6/20	0,30	(12,5+11,8+9,1+12,5+9,1+12,1)/6	11,18
13,914	20,871	5	5/20	0,25	(15,0+16,7+15,9+18,2+15,8)/5	16,31
20,871	27,827	2	2/20	0,10	(22,5+26,7)/2	24,58
27,827	34,784	2	2/20	0,10	(34,8+33,3)/2	34,06

Posteriormente, en el (v) Quinto paso: se calcula el peso ponderado para cada uno de los intervalos (Wij) (ver tabla 40). El (vi) Sexto paso: consiste en la aplicación de las ecuaciones 1 y 5 para las mediciones de tipo clásica, y las ecuaciones de 10 y 11 para la nueva métrica de medida entrópica (ver tabla 41).

Tabla 40. Cálculo de los pesos ponderados por intervalos Wij

Intervalo		Frecuencia	Pij	dij	Wij	
0	0,000	4	0,20	0,00		0,000
1	0,001	1	0,05	4,76	1/15	0,067
2	6,958	6	0,30	11,18	2/15	0,133
3	13,914	5	0,25	16,31	3/15	0,200
4	20,871	2	0,10	24,58	4/15	0,267
5	27,827	2	0,10	34,06	5/15	0,333

Tabla 41. Comparación de resultados de métricas entrópicas

Intervalo	Clásica		Extendida		Nueva	
	Ecuación 1	Ecuación 5	Ecuación 6	Ecuación 7	Ecuación 10	Ecuación 11
0	0,464	0,372	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,216	0,173	3,148	2,518	0,069	0,055
2	0,521	0,417	0,830	0,664	0,777	0,621
3	0,500	0,400	1,817	1,454	1,631	1,305
4	0,332	0,266	3,251	2,601	2,178	1,742
5	0,332	0,266	0,000	0,000	3,771	3,017
Cálculo	2,366	1,893	9,046	7,237	8,425	6,740
Complejidad	Estática	Dinámica	Estática	Dinámica	Estática	Dinámica

- **Propuesta de Método Híbrido (H):** Este método nace de la propuesta de combinar el método de índice de complejidad (CXI) con el método de Entropía de Shannon (SE), basado en la nueva métrica planteada. Dado que el primero mide los resultados de complejidad de manera total o general de un sistema, en cambio el segundo los presenta de manera parcial o específica. Esta fusión garantiza un mayor entendimiento y comprensión para la medición de la complejidad en un sistema de manufactura y a su vez considera todos los elementos descritos en el apartado (6.4).

A partir de la ecuación 8 que mide el índice de complejidad (CXI), siendo este de carácter global. Dado que intrínsecamente abarca una complejidad estática y dinámica del sistema.

$$CXI = \frac{\sum_{e=1}^k CXI_e}{k} + \frac{\max_{e=1\dots k} CXI_e}{4}$$

$$CXI = C_{estática}(Ce) + C_{dinámica}(Cd)$$

Se formulan híbridamente las proporciones equivalentes a la medida de complejidad estática (PCe) y complejidad dinámica (PCd). La Ecuación 12 mide la complejidad estática en sistemas de manufactura y la Ecuación 13 mide la complejidad dinámica, ambas de forma híbrida. Estas sirven de base o de soporte tanto para las medidas entrópicas clásicas como para la nueva métrica planteada. La tabla 42 muestra una relación de las métricas híbridas para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura

$$CXI = CXI * PC_e + CXI * PC_d$$

$$PC_e = \left[\frac{Ce}{Ct} \right] ; PC_d = \left[\frac{Cd}{Ct} \right]$$

$$CXI = CXI * \left[\frac{Ce}{Ct} \right] + CXI * \left[\frac{Cd}{Ct} \right]$$

$$CH_{estática}(CH_e) = CXI * \left[\frac{Ce}{Ct} \right] \quad (12)$$

$$CH_{dinámica}(CHd) = CXI * \left[\frac{Cd}{Ct} \right] \quad (13)$$

Tabla 42. Métricas híbridas para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura

Programación en estaciones de trabajo o recurso maquinaria Medición Híbrida CXI con Medida Entrópica (Ecuación 1 y 2)	
$CHe = \frac{\left(\frac{\sum_{e=1}^k CXI_e}{k} + \frac{\max_{e=1\dots k} CXI_e}{4} \right) * \left(- \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} \log_2 P_{ij} \right)}{Ct}$	(14)
$CHd = \frac{\left(\frac{\sum_{e=1}^k CXI_e}{k} + \frac{\max_{e=1\dots k} CXI_e}{4} \right) * \left(- \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P'_{ij} \log_2 P'_{ij} \right)}{Ct}$	(15)
Relación de estimaciones en conjunto de variables aleatorias del sistema Medición Híbrida CXI con Medida Entrópica (Ecuación 5)	
$CHd = \frac{\left(\frac{\sum_{e=1}^k CXI_e}{k} + \frac{\max_{e=1\dots k} CXI_e}{4} \right) * \left(-(1 - P) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} \log_2 P_{ij} \right)}{Ct}$	(16)
Relación de estimaciones en conjunto de variables aleatorias internas del sistema Medición Híbrida CXI con Medida Entrópica (Ecuación 10 y 11)	
$CHe = \frac{\left(\frac{\sum_{e=1}^k CXI_e}{k} + \frac{\max_{e=1\dots k} CXI_e}{4} \right) * \left(- \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\log_2 P_{ij}] W_{ij} d_{ij} P_{ij} \right)}{Ct}$	(17)
$CHd = \frac{\left(\frac{\sum_{e=1}^k CXI_e}{k} + \frac{\max_{e=1\dots k} CXI_e}{4} \right) * \left(-(1 - P) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\log_2 P_{ij}] W_{ij} d_{ij} P_{ij} \right)}{Ct}$	(18)

Fuente: Elaboración propia

6.5.3 Modelo conceptual - Vista informacional

El modelo conceptual informacional se refiere a la representación de la Información en un sistema de manufactura. De acuerdo con [316] la visión informacional debe dar soporte a la toma de decisiones basados en el flujo de datos que se necesitan de entrada y el flujo de datos que se producen. La figura 33 identifica tres puntos específicos señalizados y enumerados con flechas, a

continuación se exploran cada uno en detalle.

- **Intervención del punto 1:** Para el desarrollo de método CXI, inicialmente se recopila la información por estación de trabajo, a partir de un cuestionario estructurado y validado por [124], en su trabajo investigativo validó la herramienta en varias empresas suecas que estudiaron y analizaron los cálculos y resultados obtenidos. En los tres casos de estudio, se consideró que CXI es un método que permite evaluar la complejidad desde una óptica subjetiva y cuantitativa en una estación de trabajo.
- **Intervención del punto 2:** En este apartado la información de igual forma proviene del proceso, a partir de dos focos de trabajo, (i) La planificación, la información recopilada debe contener tiempos de setups de cada operación en cada estación de trabajo, tiempos de producción y tiempos de no producción, adicional a esto [187][325] proponen que para una medición confiable de la complejidad tanto estática como dinámica, hay que considerar la variación que existe entre lo planificado y lo que realmente sucede. Para esto se hace necesario la recopilación de datos históricos de las variables aleatorias que afectan al sistema. (ii) La programación de las actividades, la información debe ser capturada desde el mismo desarrollo del proceso. Para esto [97] proponen los cálculos de las complejidades estructurales y dinámicas de un solo recurso de fabricación, a partir de la información suministrada sobre el programa planificado y las programaciones reales ejecutadas día a día. Considerando la aparición de variables aleatorias como los tiempos de operación, tiempos de alistamiento y los tiempos de desocupación ya sean por fallas en las estaciones, falta de materia o del operario, se puede lograr por medio de técnicas de pronósticos o con el apoyo herramientas de simulación Montecarlo o de algún paquete informático.
- **Intervención del punto 3:** Para el desarrollo de método híbrido, inicialmente se recopila la información obtenida de la medición de la complejidad a partir del método Índice de complejidad (CXI). Luego se complementa con los resultados obtenidos de la medición de la complejidad dadas por el método Entropía de Shannon (SE).

6.6 Evaluación y análisis del modelo conceptual

En este apartado, se evaluará la propuesta de modelo conceptual mediante el cual se determinan aspectos fundamentales para la medición de complejidad en sistemas de manufactura, abordados desde dos enfoques de manera que se pueda establecer un cálculo de la complejidad en sistemas de manufactura híbridamente, con una perspectiva subjetiva mediante el Índice de complejidad (CXI) y una perspectiva objetiva por medio del modelo Entrópico de Shannon (SE). A continuación se desarrolla en detalle una evaluación y análisis del modelo propuesto.

6.6.1 Caso práctico de estudio

El caso práctico de manufactura se basa en recrear un escenario que simula un ambiente por producto (FS), dado que constituye un porcentaje representativo dentro del sector de manufactura

y de igual forma impacta en la variable de alta complejidad. Este se encuentra, conformado por estaciones de trabajo, operaciones, procesos y productos definidos. La investigación fue desarrollada en laboratorio, donde se dispone de recursos necesarios (ver figura 35).

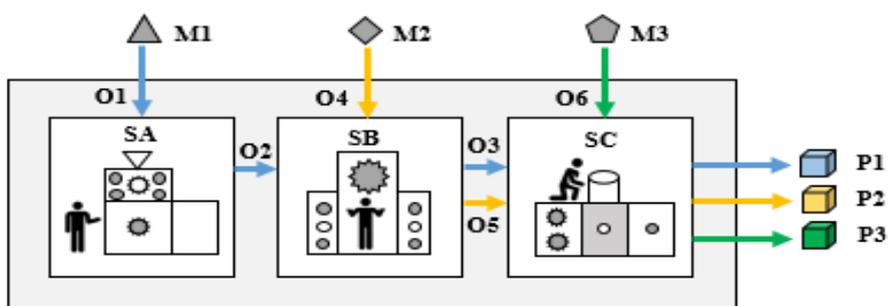
Figura 35. Foto practica en laboratorio de caso de manufactura



Fuente: Elaboración propia

Para una mejor comprensión del sistema, a continuación se presentan las relaciones entre las estaciones de trabajo, los materiales, las operaciones y productos fabricados (Ver figura 36).

Figura 36. Representación gráfica del sistema de manufactura



Fuente: Elaboración propia

El sistema produce tres tipos de productos, P1, P2 y P3, los cuales necesitan de tres tipos de materiales, M1, M2 y M3 respectivamente, estos son manufacturados en tres tipos de estaciones de trabajo SA, SB y SC, generando seis operaciones de acuerdo al flujo del producto desde O1 hasta O6.

6.6.2 Evaluación del método índice de complejidad (CXI)

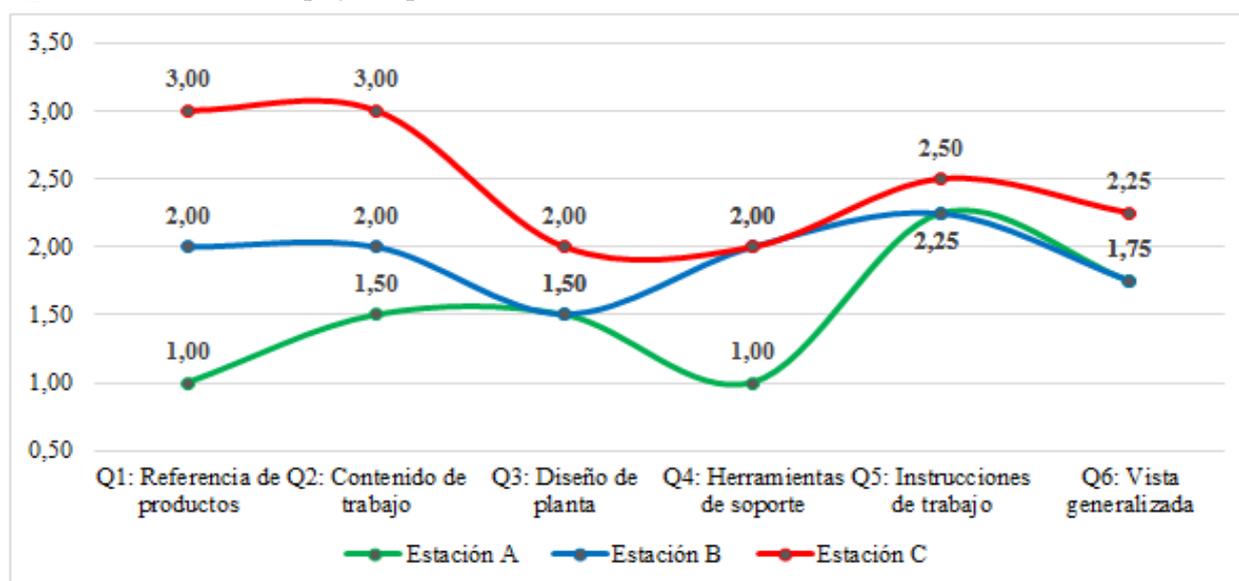
La medición de la complejidad parte de la opinión de los responsables de cada estación de trabajo. Para esto se implementó un cuestionario partiendo de seis criterios o áreas problemáticas, basado en [4], quienes establecen distintos puntos para poder desarrollar un análisis de complejidad, entre estos se encuentran: (Q1) Referencia de productos, (Q2) Contenido de trabajo, (Q3) diseño de planta, (Q4) Herramientas de apoyo, (Q5) instrucciones de trabajo y (Q6) vista generalizada, (ver anexo 1). La tabla 43 evidencia las respuestas de cada uno de los responsables por estación de trabajo.

Tabla 43. Respuesta de los responsables por estación de trabajo

	Q1					Q2					Q3					Q4			Q5			Q6		
Operador SA	4	1	1	4	1	1	2	2	2	2	1	3	1	1	2	1	1	2	2	2	2	3	2	2
Auxiliar SA	4	1	1	3	1	2	1	1	1	2	2	3	1	1	2	1	1	2	3	2	2	3	2	1
Operador SB	2	2	3	1	1	3	4	4	1	1	1	1	1	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1
Auxiliar SB	2	2	2	1	1	1	4	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	3	2	3	3	1
Operador SC	1	4	3	1	4	4	4	1	1	3	3	3	2	2	2	2	3	2	3	3	4	3	1	3
Auxiliar SC	1	4	3	1	4	3	4	1	1	4	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	3

A partir de esto se calcula el índice de complejidad por cada uno de los elementos evaluados en el cuestionario tal como se describió en la Ecuación 8. De acuerdo con [124] si el $CXI < 2$ (No se necesita ningún cambio), si se encuentra entre $2 \leq CXI < 3$ (Necesita un cambio), si el $CXI \geq 3$ (Necesita cambio urgente).

Figura 37. Índice de complejidad por elemento



Dado lo anterior se puede sintetizar que la estación C necesita un cambio urgente principalmente en los elementos asociados con los productos y variantes (Q1) y contenido de trabajo (Q2) por lo que su índice de complejidad es mayor o igual a tres (3). Adicional a esto, también que se necesitan

hacer mejoras en los otros elementos restantes (Q3 a Q6), considerando que el índice de complejidad es mayor o igual a dos (2) y menor que tres (3) (ver figura 37). Consecuente se mide la complejidad total de cada estación, utilizando la Ecuación 9, y se obtiene que la estación con mayor índice de complejidad (CXI) es la estación C con 3,208, seguido de la estación B con 2,479 y por último la estación A con 2,063, siendo está la de menor índice de complejidad (ver tabla 44).

Tabla 44. Calculo de Índice de complejidad por estación

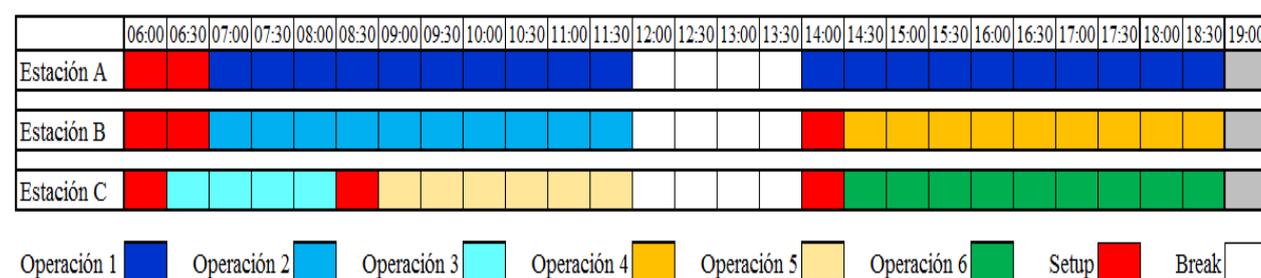
	Estación A	Estación B	Estación C
$\sum_{e=1}^k CXI_e/k$	1,50	1,92	2,46
Max CXIe	2,25	2,25	3,00
Max CXIe / 4	0,563	0,563	0,750
CXI	2,063	2,479	3,208

Fuente: Elaboración propia

6.6.3 Evaluación del método Entropía de Shannon (SE)

En este apartado se aplica la técnica entrópica cuantitativa y objetiva de información de Shannon. Partiendo del cálculo de la complejidad estática la cual hace referencia a una característica asociable a los sistemas, y también a los procesos de producción, tal tipo de complejidad se vuelve importante cuando se estudia el posible diseño de una o varias estaciones de trabajo. De acuerdo a lo descrito en la figura 36 y tomando como información de entrada la programación establecida en cada estación de trabajo. Considerando como supuestos que el sistema tiene una hora inicio a las seis (6:00) horas, luego un descanso a las doce (12:00) horas, retomando actividades a las catorce (14:00) horas y terminando su ciclo de producción a las diecinueve (19:00) horas (ver figura 38)

Figura 38. Programación de trabajo por estaciones



Fuente: Elaboración propia

A partir de la Ecuación 1, se hacen los cálculos necesarios, considerando la frecuencia observada (F_o), probabilidad (Pr) y entropía (E) de cada elemento (ver tabla 45). Al final se calcula la complejidad estática total de cada estación de trabajo, resaltando que la estación C es la de mayor complejidad estática con 2,2084 bits, seguido de la estación B con 1,8349 bits y por último a la estación A como la menos compleja estructuralmente con 0,9913 bits (ver tabla 46).

Tabla 45. Cálculo de complejidad estática en estación A

	Operación 1	Setup	Break	Total
Frecuencia (Fo)	20	2	4	26
Probabilidad (Pij) = Fo/Total	0,769	0,077	0,154	
Ecuación 1	0,2912	0,2846	0,4155	0,9913

Tabla 46. Resultados de la medición de la complejidad estática

	Estación A			Estación B			Estación C		
	Fo	Pr	Entropía (E)	Fo	Pr	Entropía (E)	Fo	Pr	Entropía (E)
Operación 1	20	0,769	0,2912						
Operación 2				10	0,385	0,5302			
Operación 3							4	0,154	0,4155
Operación 4				9	0,346	0,5298			
Operación 5							6	0,231	0,4882
Operación 6							9	0,346	0,5298
Setup	2	0,077	0,2846	3	0,115	0,3595	3	0,115	0,3595
Break	4	0,154	0,4155	4	0,154	0,4155	4	0,154	0,4155
Total	26	1,000	0,9913	26	1,000	1,8349	26	1,000	2,2084

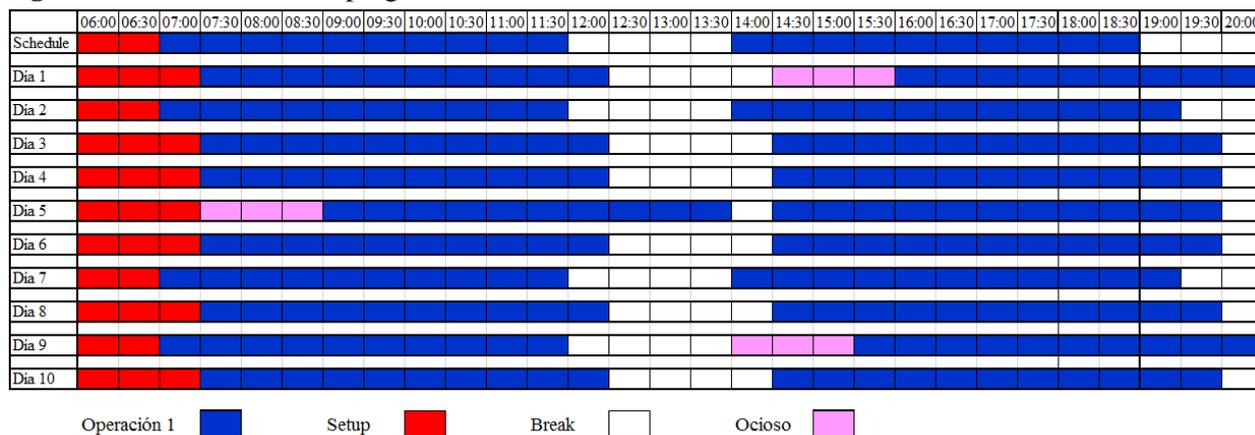
Como otra medida cuantitativa se tiene la complejidad dinámica la cual hace referencia al análisis de los sistemas a lo largo del tiempo, en otras palabras, estudia la tendencia de los estados reales que el proceso asume dentro de un horizonte de tiempo. Considerando una programación previa de las estaciones de trabajo, la tabla 47, evidencia la plantilla para la simulación utilizada para la estación de trabajo A, teniendo en cuenta una muestra de diez (10) días laborales.

Tabla 47. Simulación Montecarlo para la estación A

Evento	Inicio	Setup	Estado	Op	Ocioso	Final	Break	Estado	Op	Ocioso	Final
Día 1	6:00:00	1:02:30	O1	5:01:30	0:00:00	12:03:59	14:03:59	Ocioso	5:29:18	1:13:36	20:46:53
Día 2	6:00:00	0:57:58	O1	4:53:40	0:00:00	11:51:37	13:51:37	O1	5:33:43	0:00:00	19:25:21
Día 3	6:00:00	1:14:16	O1	5:03:58	0:00:00	12:18:13	14:18:13	O1	5:18:09	0:00:00	19:36:22
Día 4	6:00:00	1:02:19	O1	5:01:17	0:00:00	12:03:36	14:03:36	O1	5:31:20	0:00:00	19:34:57
Día 5	6:00:00	1:12:57	Ocioso	5:06:08	1:25:24	13:44:30	14:19:06	O1	5:33:18	0:00:00	19:52:24
Día 6	6:00:00	1:10:44	O1	5:03:15	0:00:00	12:14:00	14:14:00	O1	5:32:59	0:00:00	19:46:59
Día 7	6:00:00	0:49:15	O1	4:58:22	0:00:00	11:47:36	13:47:36	O1	5:29:33	0:00:00	19:17:09
Día 8	6:00:00	1:14:10	O1	5:02:35	0:00:00	12:16:45	14:16:45	O1	5:22:20	0:00:00	19:39:05
Día 9	6:00:00	0:57:11	O1	4:56:46	0:00:00	11:53:58	13:53:58	Ocioso	5:37:53	1:27:10	20:59:01
Día 10	6:00:00	1:03:01	O1	5:02:37	0:00:00	12:05:38	14:05:38	O1	5:33:47	0:00:00	19:39:25

La figura 39, muestra la sucesión de las operaciones desarrolladas en la estación A, durante los diez (10) eventos simulados, considerando solamente la operación (O1), los alistamientos iniciales en cada jornada, el break programado y tiempos improductivos por fallos en los recursos.

Figura 39. Simulación de la programación de la estación A



De igual forma se desarrolla la simulación de la programación de las operaciones en la estación B, considerando la operación (O2) en la jornada inicial y la operación (O4) en la jornada final, teniendo en cuenta que antes de desarrollar dichas operaciones se necesita de un tiempo de alistamiento, un break programado entre ellas y tiempos improductivos por fallos en los recursos de forma eventual (ver figura 40).

Figura 40. Simulación de la programación de la estación B

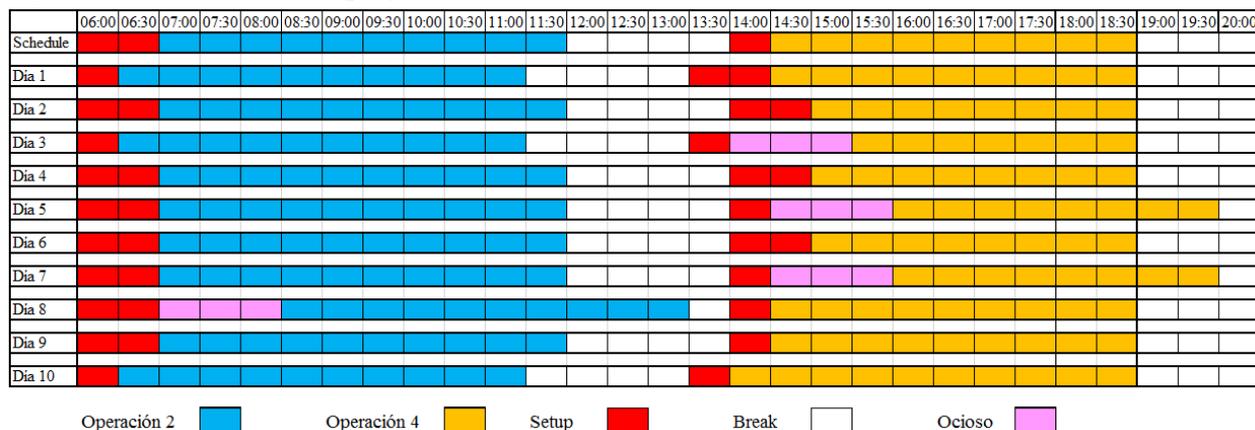


Figura 41. Simulación de la programación de la estación C

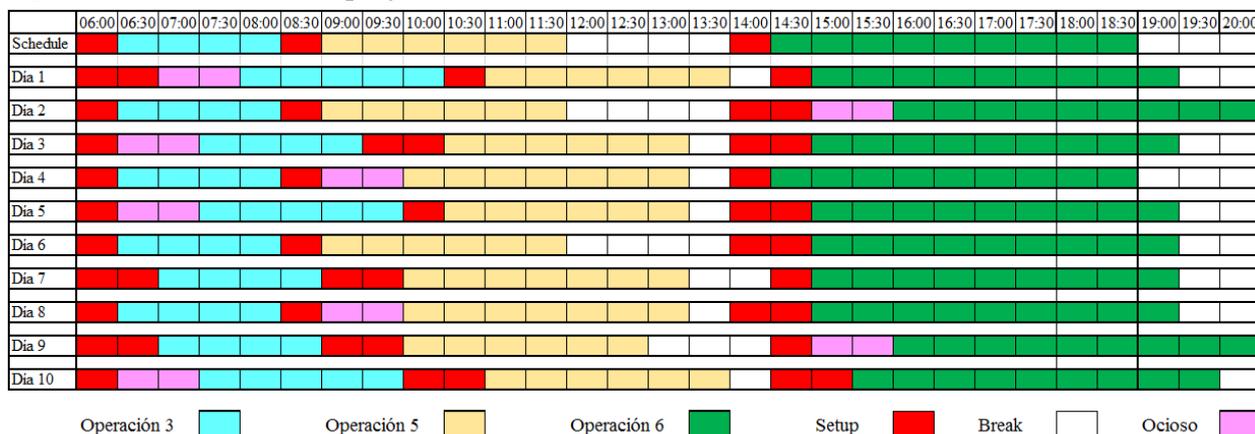


Tabla 48. Resultados de la medición de la complejidad dinámica en la estación C

	Observaciones										Estación C		
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Fo	Pr	E
Operación 3	5	4	4	4	5	4	4	4	4	5	43	0,165	0,4294
Operación 5	6	6	6	7	6	6	7	7	6	6	63	0,242	0,4955
Operación 6	8	6	8	9	8	8	8	8	6	7	76	0,292	0,5187
Setup	4	4	5	3	4	4	5	4	5	5	43	0,165	0,4294
Ocioso	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	16	0,062	0,2475
Break	1	4	1	1	1	4	2	1	3	1	19	0,073	0,2758
Total	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	260	1,000	2,396

Tabla 49. Resultados de la medición de la complejidad dinámica en la estación B

	Observaciones										Estación B		
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Fo	Pr	E
Operación 2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	100	0,385	0,530
Operación 4	9	8	7	8	6	8	6	9	9	10	80	0,308	0,5232
Setup	3	4	2	4	3	4	3	3	3	2	31	0,119	0,3658
Ocioso	0	0	3	0	3	0	3	3	0	0	12	0,046	0,2048
Break	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4	37	0,142	0,400
Total	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	260	1,000	2,024

Tabla 50. Resultados de la medición de la complejidad dinámica en la estación A

	Observaciones										Estación A		
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Fo	Pr	E
Operación 1	16	20	19	19	19	19	20	19	17	19	187	0,719	0,342
Setup	3	2	3	3	3	3	2	3	2	3	27	0,104	0,3393
Ocioso	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	9	0,035	0,168
Break	4	4	4	4	1	4	4	4	4	4	37	0,142	0,4003
Total	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	260	1,000	1,250

Por último se simula la programación de la estación C, tal como se muestra en la figura 41, considerando las operaciones (O3), (O5) y (O6) y las mismas condiciones expuestas en los casos anteriores.

A partir de la ecuación 2, y de los veintiséis (26) puntos en el tiempo de observación, con hora de apertura a las seis (6:00) horas y hora de corte a las diecinueve (19:00) horas, se hacen los cálculos necesarios, considerando la frecuencia observada (F_o), probabilidad (Pr) y entropía (E) de cada elemento. Al final se calcula la complejidad dinámica total de cada estación de trabajo, resaltando que la estación C es la de mayor complejidad dinámica con 2,396 bits (ver tabla 48), seguido de la estación B con 2,024 bits (ver tabla 49) y por último a la estación A como la menos compleja dinámicamente con 1,250 bits (ver tabla 50).

Otro tipo de modalidad a utilizar es por medio de un paquete informático, el programa utilizado es ProModel. En el anexo 3 se evidencia la programación del modelamiento. Para efectos de cálculos de la complejidad dinámica, se aplicó la Ecuación 2. Resaltando que la estación C es la de mayor complejidad dinámica con 1,3184 bits, seguido de la estación B con 1,1069 bits y por último la estación A como la menos compleja dinámicamente con 0.9436 bits (ver tabla 51).

Tabla 51. Resultados de la simulación con ProModel del caso estudio.

	% Operación	% Setup	% Ocioso	% Espera	% Bloqueo	% Down	Total
Estación A	8,81	5,33	3,71	0,00	82,15	0,00	100,00
Estación B	15,66	5,07	3,44	0,00	75,83	0,00	100,00
Estación C	63,13	18,30	18,57	0,00	0,00	0,00	100,00
	% Operación	% Setup	% Ocioso	% Espera	% Bloqueo	% Down	Total
Estación A	0,0881	0,0533	0,0371	0,0000	0,8215	0,0000	1,0000
Estación B	0,1566	0,0507	0,0344	0,0000	0,7583	0,0000	1,0000
Estación C	0,6313	0,1830	0,1857	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
	% Operación	% Setup	% Ocioso	% Espera	% Bloqueo	% Down	Complejidad Dinámica
Estación A	0,3088	0,2254	0,1763		0,2330		0,9436
Estación B	0,4189	0,2181	0,1672		0,3027		1,1069
Estación C	0,4189	0,4484	0,4511				1,3184
Total							3,3688

En síntesis los resultados dan respuesta a las hipótesis planteadas (H9) en las que se corrobora que en la medición de la complejidad de sistemas de manufactura, el método subjetivo de índice de complejidad (CXI) está alineado con los resultados finales del método objetivo entrópico de Shannon, soportando de esta manera el desarrollo y evaluación de un modelo híbrido conceptual fundamentado en heurísticas y mediciones entrópicas.

En este apartado se aplica la técnica entrópica cuantitativa y objetiva de información de Shannon. Partiendo del cálculo de la complejidad estática la cual hace referencia a una característica asociable a los sistemas, y también a los procesos de producción, tal tipo de complejidad se vuelve importante cuando se estudia el posible diseño de una o varias estaciones de trabajo. De acuerdo a lo descrito en la figura 36 y tomando como información de entrada la programación establecida en cada estación de trabajo. Considerando como supuestos que el sistema tiene una hora inicio a las seis (6:00) horas, luego un descanso a las doce (12:00) horas, retomando actividades a las catorce (14:00) horas y terminando su ciclo de producción a las diecinueve (19:00) horas (ver figura 38)

6.6.4 Evaluación del método Híbrido (H)

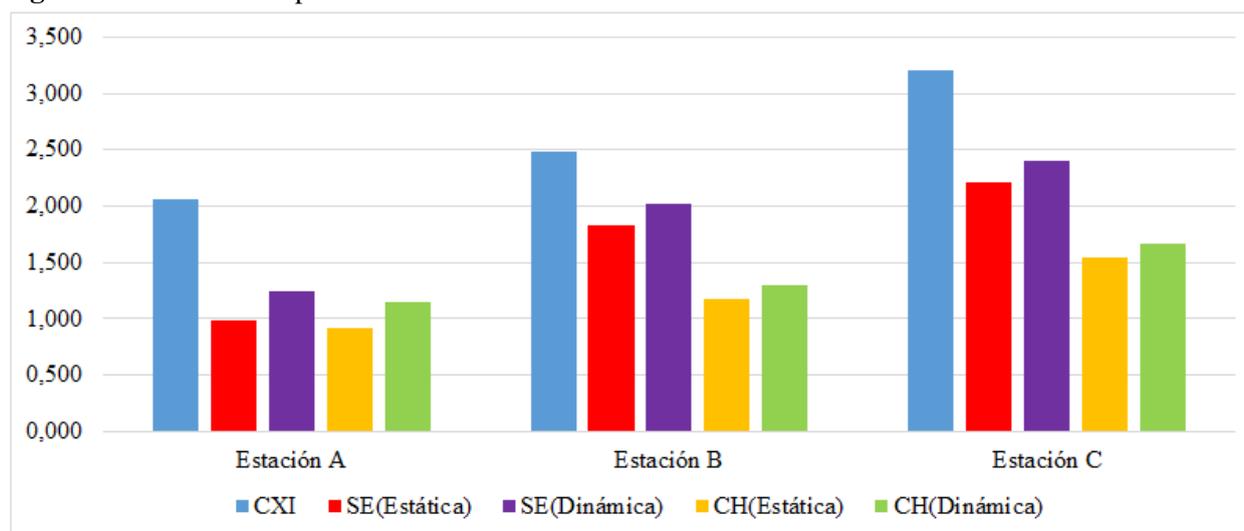
El método Híbrido (H) se desarrolla tomando como fuente de información lo descrito en la figura 36 y los resultados previos obtenidos con el método de índice de complejidad (CXI) y el método de Entropía de Shannon (SE). Adicionalmente algunas características que justifican esta fusión, como:

- La fabricación requiere recursos para producir el producto, incluida una infraestructura de personas en una organización que proporciona uno de los soportes necesarios.
- Un sistema complejo es una mezcla de aspectos relacionados con el material, las maquinarias, las personas, el proceso, las instalaciones y los flujos relacionados con la información, materiales y documentos.
- En los últimos diez años un incremento en la consideración de factores como el diseño o estructura (Ds) y el proceso (Pr). Y el poco desarrollo hacia elementos como personas (Pe), productos (Pd), planificación y programación (Ps), (ver tabla 7).
- En el estudio de los efectos (ver apartado 3.4.3) los más representativos en cada uno de los subsectores y los elementos con mayor impacto en el sector manufacturero, se destaca el elemento personas con un 86,6%, seguido del producto con un 83,2%, lo que significa que un incremento en la complejidad genera mayores efectos en estos elementos, luego el proceso y la planificación con un 70,3% y finalmente la planta con un 67,9% (ver tabla 18).
- Dado que existe una programación en estaciones de trabajo o recurso maquinaria, para la medición Híbrida CXI con Medida Entrópica se emplea las Ecuaciones 14 y 15 (Tabla 42).

A continuación se mide la complejidad estática y dinámica de cada estación, utilizando la Ecuación 1 y 2 respectivamente (ver tabla 52). Se obtiene que la estación con mayor complejidad estática (Ce) y dinámica (Cd) es la estación C con 1,538 bits y 1,669 bits respectivamente. A su vez se puede evidenciar que la estación A con una Ce de 0,912 bits y una Cd de 1,150 bits lo que la constituye como la estación de menor complejidad en el sistema. En la figura 42 se puede apreciar la comparación de los resultados entre los distintos métodos, es evidente la coincidencia entre ellos, resaltando en particular este último método híbrido dado que tiene cuenta la combinación entre la percepción de las personas, la configuración del sistema y lo planificado o programado.

Tabla 52. Cálculo de complejidad estática y dinámica con método Híbrido

Ecuación	Estación A	Estación B	Estación C
Ecuación 9	2,063	2,479	3,208
Ecuación 1	0,991	1,834	2,208
Ecuación 2	1,250	2,024	2,396
Ct =Complejidad Total	2,241	3,859	4,605
Complejidad Estática (Ecuación 14)	0,912	1,178	1,538
Complejidad Dinámica (Ecuación 15)	1,150	1,300	1,669

Figura 42. Análisis comparativo de los resultados obtenidos

6.7 Conclusiones del capítulo

Para una gestión eficaz es de vital importancia calcular métricas que sirvan como parámetros para establecer planes de mejora, a su vez determinar patrones de comparación según diferentes configuraciones, estructuras, componentes y diseños. Este capítulo se basó en el desarrollo de un modelo conceptual y un nuevo método entrópico que sirva de apoyo a la aplicación de modelos matemáticos y a los tomadores de decisiones para un mayor entendimiento procedimental. Su construcción se visionó desde tres miradas, una física, funcional y otra informacional, lo que permite una claridad de los elementos y características fundamentales en la medición de la complejidad, desde una perspectiva subjetiva con el método Complexity Index (CXI) y objetiva con el método entrópico de Shannon, conllevando finalmente a la generación de un método Híbrido (H). Cabe resaltar, que para su diseño fueron necesarias unas series de consideraciones, producto del resultado investigativo en capítulos anteriores. La evaluación fue satisfactoria ya que permitió corroborar las hipótesis planteadas (H8) y (H9). En síntesis, la nueva métrica para la medición entrópica de la complejidad en sistemas de manufactura ayuda a solventar las deficiencias e inconvenientes encontrados y descritas en la literatura, y el método híbrido (H) propuesto toma relevancia dado que combina información proveniente de las personas, de la configuración del sistema y lo planificado o programado, fundamento que resulta útil en sistemas de manufactura e inclusive para escenarios futuros como los de servicios.

Capítulo 7

Aplicación del modelo en sistema Flow Shop (FS) y Make to Stock (MTS)

7.1 Objetivo

- **(OE5)**- Validar el impacto del modelo y nueva métrica propuesta, que permita una evaluación y entendimiento actual del sistema, en casos de estudios del sector de manufactura de pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena – Colombia.

7.2 Caso de aplicación

En este capítulo, se abordará la aplicación del modelo desde un entorno realista. Para esto se tendrán en cuenta los elementos y las decisiones directamente vinculadas a las aportaciones realizadas en capítulos anteriores. El caso de aplicación va dirigido a una empresa de operaciones en la ciudad de Cartagena – Colombia, perteneciente al sector de manufactura, específicamente al subsector en fabricación de materiales plásticos y resinas. Para su ejecución se hace necesario conocer ampliamente el sistema, su estructura, proceso operativo y configuración. Se debe tener en cuenta que los resultados que se obtienen se sitúan en el ámbito decisional del mediano y largo plazo, y lo que se pretende es que las decisiones estén enmarcadas desde un ámbito de la gestión de la complejidad del sistema de manufactura. Por efectos de confidencialidad se reserva el nombre de la compañía participante.

7.2.1 Generalidades de la empresa

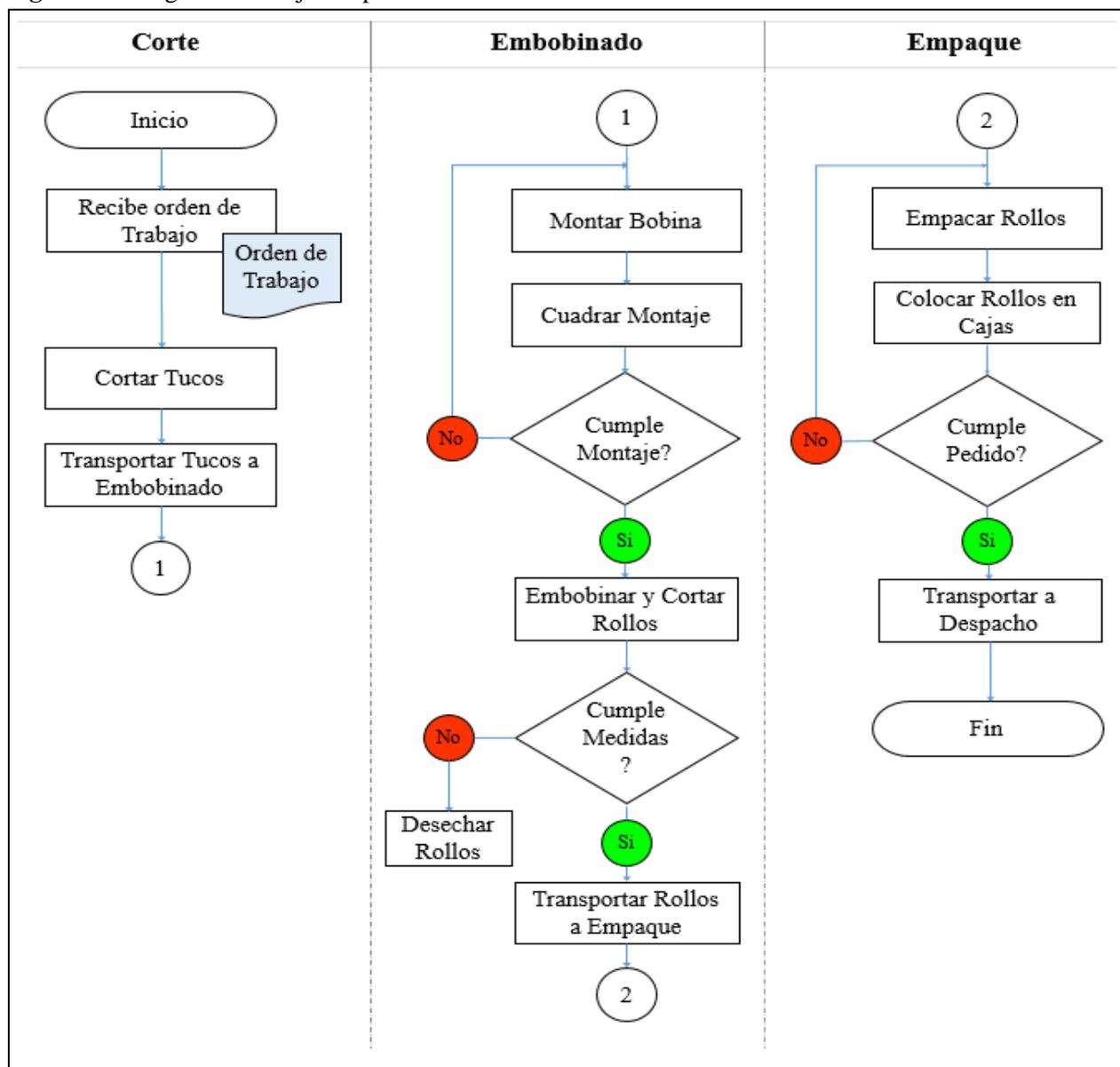
La empresa fue fundada en 1986, con sede principal en la ciudad de Cartagena.- Colombia, ubicada en el sector industrial de Mamonal. Es una compañía con tecnología Suiza. Su objeto social es la fabricación, comercialización y distribución de toda clase de cintas adhesivas de las cuales posee una amplia gama en cuanto a usos y presentaciones. Diez (10) años más tarde inicia una etapa de alto crecimiento industrial y comercial, logrando tener una fuerza de venta cubriendo todo el territorio Nacional. Posicionándose en los primeros lugares en Colombia. Al mismo tiempo había construido una división de exportación para cubrir América Latina. Los primeros frutos fueron recibidos exportando a la cuenca del Caribe siendo importante en el suministro de productos de embalaje para estos países. Actualmente se ha convertido en una firma que exporta a todo Centro-Sur América y El Caribe; ofreciendo la gama más completa de productos como solución en Adherencia del Sector Comercial-Industrial y Autoservicio⁵.

⁵ Tomado de la página web de la empresa

7.2.2 Proceso de manufactura

El proceso inicia con la generación de órdenes de trabajo, la cual especifica tipos de referencias, cantidad de tucos, tipo de bobina, volumen de producción, estaciones de trabajo involucradas y tiempo estimado de entrega. Esta es entregada a la locación de materias primas, por parte del Jefe de producción (Ing. Darwin Ramos). La fabricación comienza con el corte de tucos en la medida que contiene la orden de trabajo, ya sea en 12, 18, 24, 48 y 72 mm, en las máquinas de corte - Cortatuco. Los tucos previamente cortados pasan a las máquinas embobinadoras M2500, M3000, NGR350 y TE200. Las bobinas procesadas que intervienen son de tipo adhesivadas de polipropileno (BOBPP) o adhesivadas de papel (BOBCR). Al finalizar el proceso resultan productos tipo rollos de cintas con las dimensiones del tuc y de las características de la bobina. Por último se realiza la marcación de cajas con el número de la orden de trabajo, fecha, cantidad, referencia y medida del producto (ver figura 43).

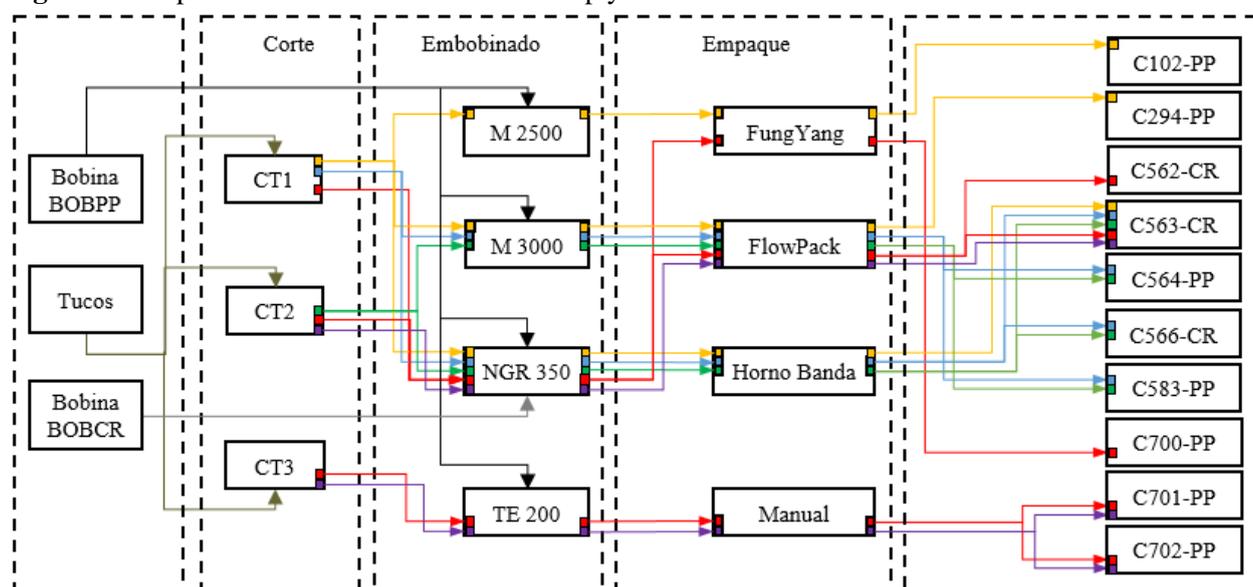
Figura 43. Diagrama de flujo del proceso



Cabe resaltar que en el embobinado los anchos mencionados en cada máquina se deben realizar montajes diferentes para cada ancho y la dimensión del largo de la cinta se programa en el tablero de control de la máquina. En la figura 44 se puede apreciar la representación del sistema de producción de cada una de las líneas de acuerdo al espesor del ancho en milímetros (mm). Los rollos de anchos 12 el color característico es el amarillo, 18 con color azul, 24 con color verde, 48 con color rojo y 72 con color violeta.

Las bobinas una vez salen del proceso de embobinado posteriormente son transportadas para ser empacadas. Para esto existen unas máquinas de termosellado para empaque individual, denominadas Fungyang, Flowpack y Horno banda. Las cintas de anchos 48 mm y 72 mm no llevan empaque individual, estos se empacan de manera manual directamente en la caja.

Figura 44. Representación del sistema Flow Shop y Make To Stock



Fuente: Elaboración propia

7.3 Características del sistema a modelar

A continuación se hace mención de algunas características tenidas en cuenta del sistema para su modelado:

- Cada estación de trabajo se dedica a una operación particular.
- Un día laborado de operación consta de 9 horas, teniendo en cuenta el tiempo de preparación y alistamiento.
- En la jornada laboral existe un break o descanso laboral de 1 hora diaria.
- Un mes productivo consta de 20 días laborales, que involucra las paradas inesperadas por reparaciones mínimas y tiempos ociosos que se dan en el día a día de la operación.
- Los datos suministrados por la empresa comprenden los periodos desde 2017 al 2019.

7.4 Parámetros para el modelamiento

A partir de visitas de campo y de varias reuniones con los diversos responsables del sistema productivo, se ha recopilado información suficiente para poder desarrollar de manera global el modelo propuesto (ver figura 45). Cabe resaltar, que algunos datos suministrados por la empresa son de carácter confidencial, para esto, se ha determinado trabajar con datos aproximados que permitan un acercamiento al sistema real y poder realizar los diferentes cálculos.

Figura 45. Recogida de datos e información en caso de estudio Flow Shop y Make To Stock



Fuente: Fotos propias tomadas en la empresa caso de estudio

7.4.1 Datos del instrumento aplicado

A continuación, en la tabla 53 se muestran los datos obtenidos a partir del instrumento diseñado (ver anexo 1). Partiendo de distintos puntos para poder desarrollar un análisis de complejidad, entre estos se encuentran: (Q1) Referencia de productos, (Q2) Contenido de trabajo, (Q3) diseño de planta, (Q4) Herramientas de apoyo, (Q5) instrucciones de trabajo y (Q6) vista generalizada. Y de igual forma considerando las respuestas de cada uno de los responsables por cada estación de trabajo.

Tabla 53. Datos del instrumento aplicado en cada área de trabajo

	Q1					Q2					Q3					Q4			Q5				Q6	
Operador CT1	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2
Operador CT2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
Operador CT3	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	1
Operador M2500	1	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	3	2	2	1	2	3	2	1
Ayudante M2500	1	3	3	1	2	2	3	1	1	3	3	3	2	2	2	2	3	2	3	3	3	3	1	3
Operador M3000	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	4	4	3	4	2	3
Ayudante M3000	3	3	3	4	3	3	2	3	2	3	3	2	3	2	2	2	3	2	3	3	3	4	3	2
Operador NGR350	5	4	4	4	5	4	4	5	4	5	2	3	2	3	3	2	3	2	5	5	4	5	3	2
Ayudante NGR350	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	2	3	3	3	3	2	2	3	5	4	5	5	2	3
Operador TE200	2	2	2	1	1	1	4	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	3	2	3	3	1
Operador Fungyang	2	3	3	2	2	3	3	2	2	3	1	2	1	2	1	2	2	2	2	3	2	2	2	2
Operador Flowpack	5	5	4	5	4	3	3	3	4	3	2	2	2	2	2	2	1	1	5	4	4	4	3	3
Operador Horno	4	3	4	3	4	3	3	3	3	3	2	2	3	2	2	2	3	2	4	3	3	3	1	1
Operador Manual	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1

7.4.2 Datos de la programación estática por estaciones

La figura 46 se muestra la programación de trabajo por estaciones, considerando que el sistema tiene una hora inicio a las siete (7:00) horas, luego un descanso a las doce (12:00) horas, retomando actividades a las trece (13:00) horas y terminando su ciclo de producción a las diecisiete (17:00) horas. El color verde evidencia el estado activo (Operación) de las estaciones, el color rojo en alistamiento y configuración (Setup) y el color blanco en descanso (Break).

Figura 46. Información de programación estática de trabajo por estaciones

	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	
CT1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
CT2	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
CT3	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
M2500	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
M3000	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
NGR350	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
TE200	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
FUNGYANG	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
FLOWPACK	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
HORNO	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
MANUAL	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Operación █ Setup █ Break █

7.4.3 Datos de la programación dinámica por estaciones

En la figura 47 se muestran la obtención de las programaciones dinámicas por estaciones, considerando un horizonte de tiempo de 20 días productivos, equivalente a 1 mes de trabajo. Durante este periodo se tuvieron en cuenta los distintos estados en los diversos puntos en el tiempo.

Figura 47. Información de programación dinámica por estaciones



7.4.4 Datos reales de la variable demanda de los productos⁶

Tabla 54. Datos históricos reales de la variable demanda por productos

Producto	Demanda Real 2017				Demanda Real 2018				Demanda Real 2019			
	Trimestre I	Trimestre II	Trimestre III	Trimestre IV	Trimestre I	Trimestre II	Trimestre III	Trimestre IV	Trimestre I	Trimestre II	Trimestre III	Trimestre IV
C102-PP12	9185	6250	18589	33550	9350	6814	18107	33073	9344	6500	17361	33326
C294-PP12	7405	3846	8471	1800	7098	4877	9715	2100	7658	3703	9640	2250
C562-CR48	14616	10584	28728	34500	14869	10031	28212	34600	14576	10165	28791	34456
C563-CR12	99166	70334	80850	84142	99668	70462	80484	84906	99873	70252	80884	84413
C563-CR18	21220	16772	29500	20983	21751	16252	29230	20484	21485	16852	29353	20506
C563-CR24	44277	34000	51398	38730	45100	33494	51250	38969	44384	33179	51437	38250
C563-CR48	11648	12768	27328	30508	11100	12905	27100	30912	11838	12672	27250	30408
C563-CR72	13640	2640	17248	27500	13777	3935	17797	27600	13065	3543	17048	27132
C564-PP18	28000	10752	23520	25760	28100	10624	23138	25695	28250	10250	23152	25722
C564-PP24	26800	9500	23900	25300	26500	12100	25400	22137	26840	11450	24700	23400
C566-CR18	7503	7418	6432	4500	7782	7402	6639	4173	7185	7114	6617	4314
C566-CR24	22384	14216	19502	17424	23100	14110	19413	17603	22410	14531	19429	17544
C583-PP18	19596	15000	16552	9670	20100	14715	16384	9366	19757	14753	16623	9958
C583-PP24	3800	3240	6500	3456	4600	3000	6600	3616	3806	2996	5149	4550
C700-PP48	56866	33000	35028	48180	56420	32930	35011	48365	56272	32603	35395	47550
C701-PP48	70600	65086	69867	68399	70709	65304	72820	68849	70250	65823	71500	68800
C701-PP72	23567	16366	29810	24697	29039	16253	28168	21915	25925	22416	28750	24570
C702-PP-48	21000	20061	32695	18180	20495	20348	32064	18409	21000	20611	32451	18505
C702-PP-72	66550	45246	77383	63842	66316	47403	76034	60100	71950	54430	74385	63557

⁶ Información suministrada por la compañía objeto de estudio

7.4.5 Datos previstos de la variable demanda de los productos⁷

Tabla 55. Datos históricos previstos de la variable demanda por productos

Producto	Demanda Prevista 2017				Demanda Prevista 2018				Demanda Prevista 2019			
	Trimestre I	Trimestre II	Trimestre III	Trimestre IV	Trimestre I	Trimestre II	Trimestre III	Trimestre IV	Trimestre I	Trimestre II	Trimestre III	Trimestre IV
C102-PP12	9250	6250	18500	34500	9350	6350	18600	34600	9500	6500	18750	34750
C294-PP12	7500	3900	9000	2000	7600	4000	9100	2100	7750	4150	9250	2250
C562-CR48	14500	11500	28500	34500	14600	11600	28600	34600	14750	11750	28750	34750
C563-CR12	100000	70000	80000	90000	100100	70100	80100	90100	100250	70250	80250	90250
C563-CR18	21500	16500	29500	20500	21600	16600	29600	20600	21750	16750	29750	20750
C563-CR24	45000	34000	52000	38000	45100	34100	52100	38100	45250	34250	52250	38250
C563-CR48	11000	12000	27000	30000	11100	12100	27100	30100	11250	12250	27250	30250
C563-CR72	13500	2500	17500	27500	13600	2600	17600	27600	13750	2750	17750	27750
C564-PP18	28000	10000	23000	25000	28100	10100	23100	25100	28250	10250	23250	25250
C564-PP24	25500	9500	22500	22500	25600	9600	22600	22600	25750	9750	22750	22750
C566-CR18	8000	8000	7000	4500	8100	8100	7100	4600	8250	8250	7250	4750
C566-CR24	23000	15000	20000	18000	23100	15100	20100	18100	23250	15250	20250	18250
C583-PP18	20000	15000	17000	10000	20100	15100	17100	10100	20250	15250	17250	10250
C583-PP24	4500	3500	6500	4500	4600	3600	6600	4600	4750	3750	6750	4750
C700-PP48	55000	33000	34000	50000	55100	33100	34100	50100	55250	33250	34250	50250
C701-PP48	70000	65000	70000	65000	70100	65100	70100	65100	70250	65250	70250	65250
C701-PP72	21500	18500	28500	21500	21600	18600	28600	21600	21750	18750	28750	21750
C702-PP-48	21000	21000	31000	20000	21100	21100	31100	20100	21250	21250	31250	20250
C702-PP-72	62000	41000	71000	60000	62100	41100	71100	60100	62250	41250	71250	60250

⁷ Información suministrada por la compañía objeto de estudio

7.5 Resultados y análisis del modelo

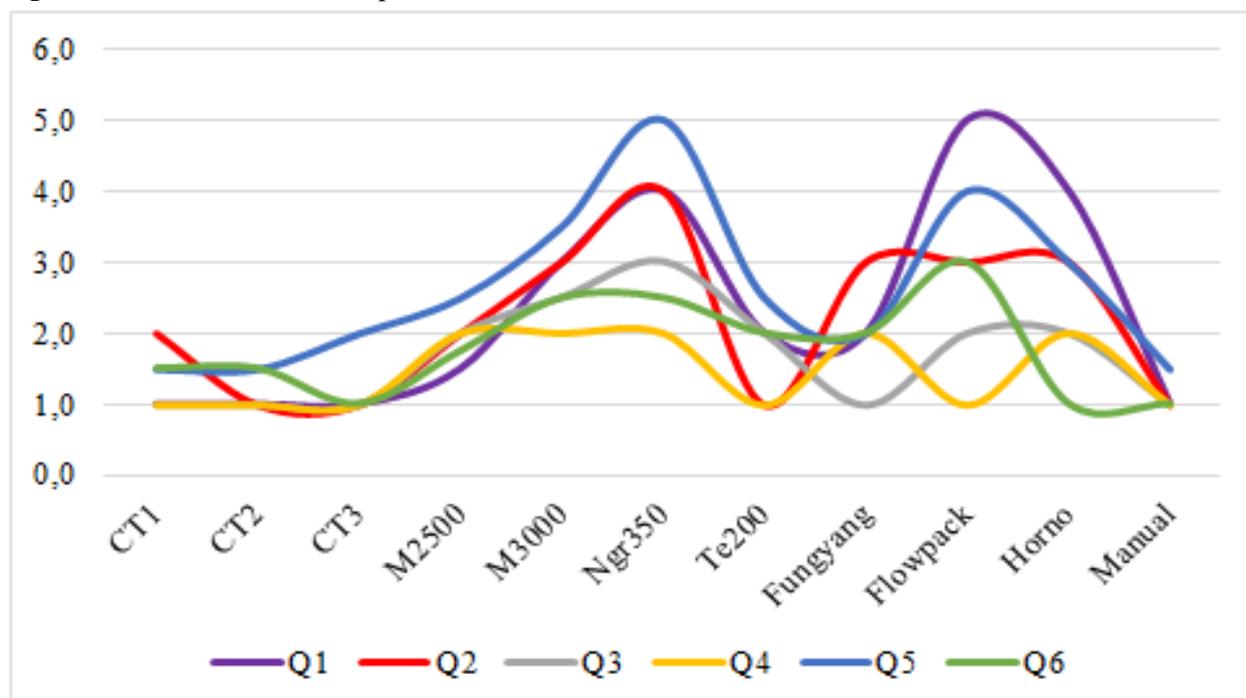
La propuesta de modelado para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura, busca poder determinar la cantidad de bits generada en el proceso, específicamente en cada una de las estaciones de trabajo y en los diferentes productos. Para su desarrollo se tendrán en cuenta dos focos de medición, considerando (i) Programación en estaciones de trabajo o recurso maquinaria, y (ii) Relación de estimaciones o programación en variables del sistema.

El modelo se solucionó a través del diseño conceptual planteado en el capítulo 6, y mediante el procesamiento de la información o datos suministrados en el ítem 7.4. Los resultados son una validación práctica de la propuesta de modelado y el análisis que se desarrolla evalúa el comportamiento del modelo.

7.5.1 Resultados de acuerdo a programación en estaciones de trabajo

El modelo calcula el índice de complejidad (CXIe) por cada uno de los elementos evaluados en el cuestionario (Ecuación 8). La figura 48 evidencia que se necesita un cambio urgente en el ítem (Q1) Referencia de productos, dado que genera una alta complejidad en las estaciones M300, Ngr350, Flowpack y Horno. De igual forma en el ítem (Q2) Contenido de trabajo, que comprende las estaciones anteriormente mencionadas y la de Fungyang. Por último, el ítem, (Q5) instrucciones de trabajo, focalizado en las estaciones M3000, Ngr350 y Flowpack.

Figura 48. Resultado del CXIe por elementos evaluados



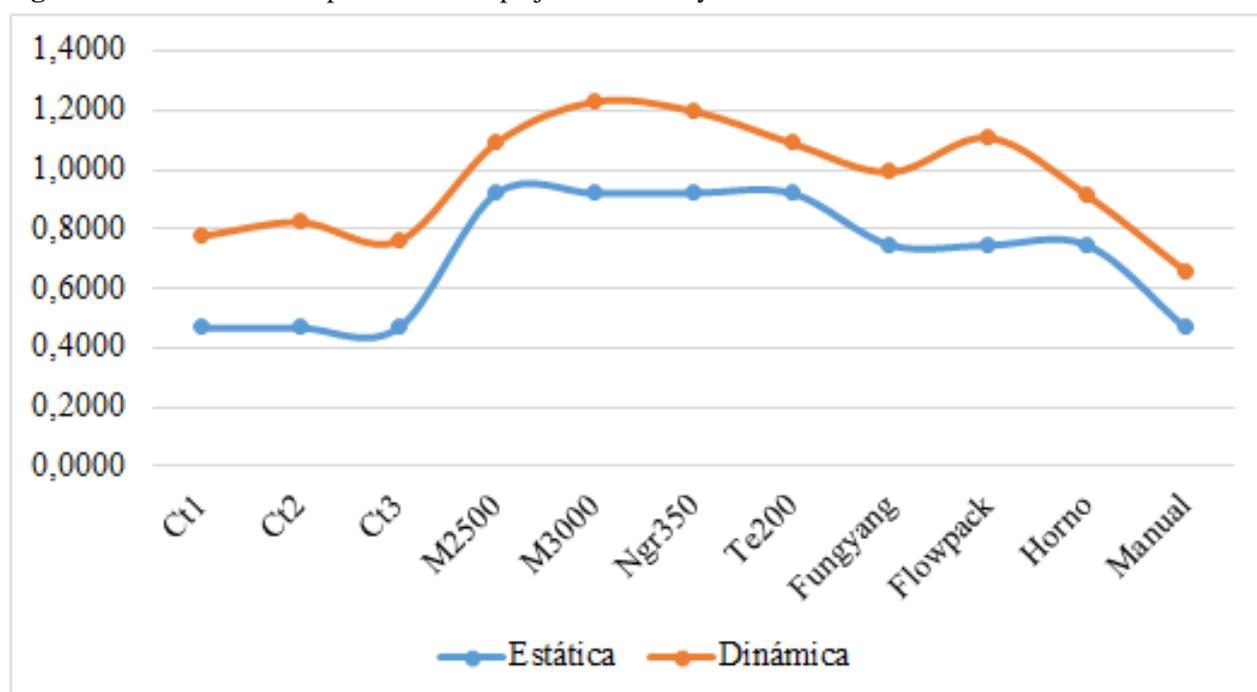
La tabla 56 muestra el cálculo detallado del índice de complejidad total (CXI) por estaciones de trabajo (Ecuación 9), evidenciando una alta complejidad en las estaciones M300, Ngr350, Flowpack y Horno.

Tabla 56. Resultados del CXI por estaciones de trabajo

	Ct1	Ct2	Ct3	M2500	M3000	Ngr350	Te200	Fungyang	Flowpack	Horno	Manual
Q1	1,0	1,0	1,0	1,5	3,0	4,0	2,0	2,0	5,0	4,0	1,0
Q2	2,0	1,0	1,0	2,0	3,0	4,0	1,0	3,0	3,0	3,0	1,0
Q3	1,0	1,0	1,0	2,0	2,5	3,0	2,0	1,0	2,0	2,0	1,0
Q4	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0
Q5	1,5	1,5	2,0	2,5	3,5	5,0	2,5	2,0	4,0	3,0	1,5
Q6	1,5	1,5	1,0	1,8	2,5	2,5	2,0	2,0	3,0	1,0	1,0
Pm	1,3	1,2	1,2	2,0	2,8	3,4	1,8	2,0	3,0	2,5	1,1
Mx	2,0	1,5	2,0	2,5	3,5	5,0	2,5	3,0	5,0	4,0	1,5
	0,5	0,4	0,5	0,6	0,9	1,3	0,6	0,8	1,3	1,0	0,4
CXI	1,8	1,5	1,7	2,6	3,6	4,7	2,4	2,8	4,3	3,5	1,5

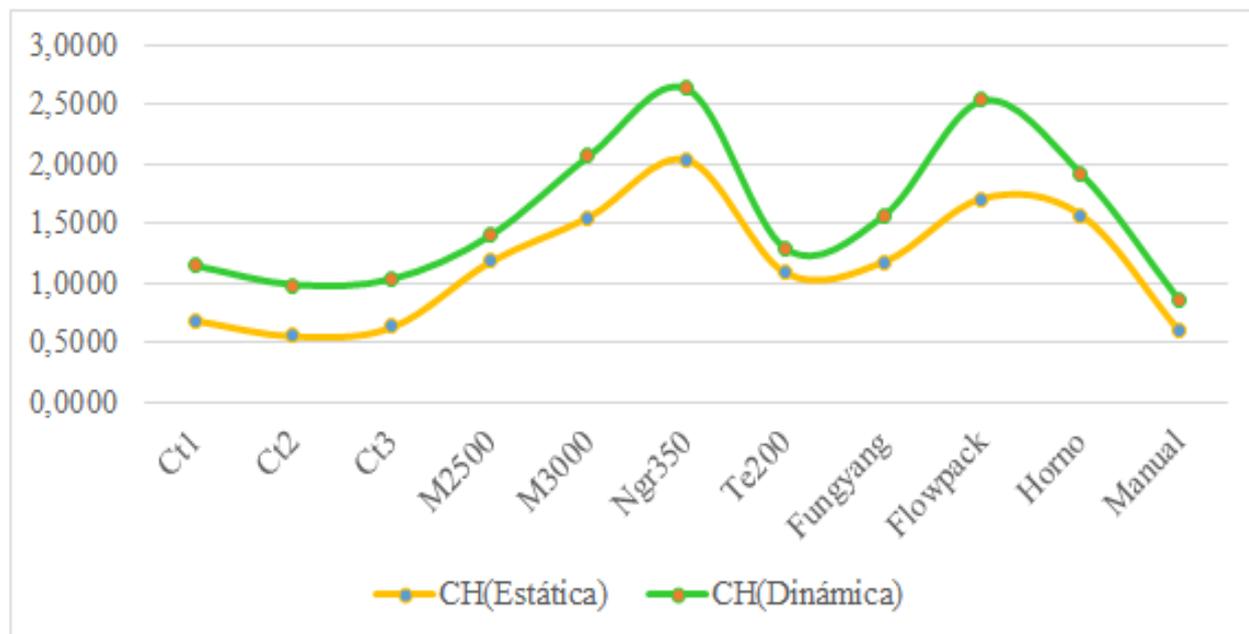
A partir de la Ecuación 1 y Ecuación 2 se obtienen los cálculos entrópicos de la complejidad estática y dinámica. La figura 49 evidencia una alta complejidad conjunta en las estaciones M2500, M3000, Ngr350, Te200 y Flowpack (Ver anexo 4 y 5)

Figura 49. Resultado entrópico de la complejidad estática y dinámica



Partiendo de estos resultados, se aplica el modelo híbrido para un cálculo de manera consolidada (Ecuación 14 y 15). La figura 50 evidencia una alta complejidad tanto estática como dinámica en las estaciones Ngr350 y Flowpack, seguidas de las estaciones M3000 y Horno (Ver anexo 5). Convirtiéndose estas en focos habilitadores para procesos de mejora, que permitan reducirla o eliminarla. Dado que en el capítulo 5 en ítem 5.6 se pudo establecer que una alta complejidad estática tiene incidencia directa con los productos fabricados, los productos en procesos, la velocidad de producción y productividad. Adicional a esto, una alta complejidad dinámica está altamente correlacionada con los costos de producción.

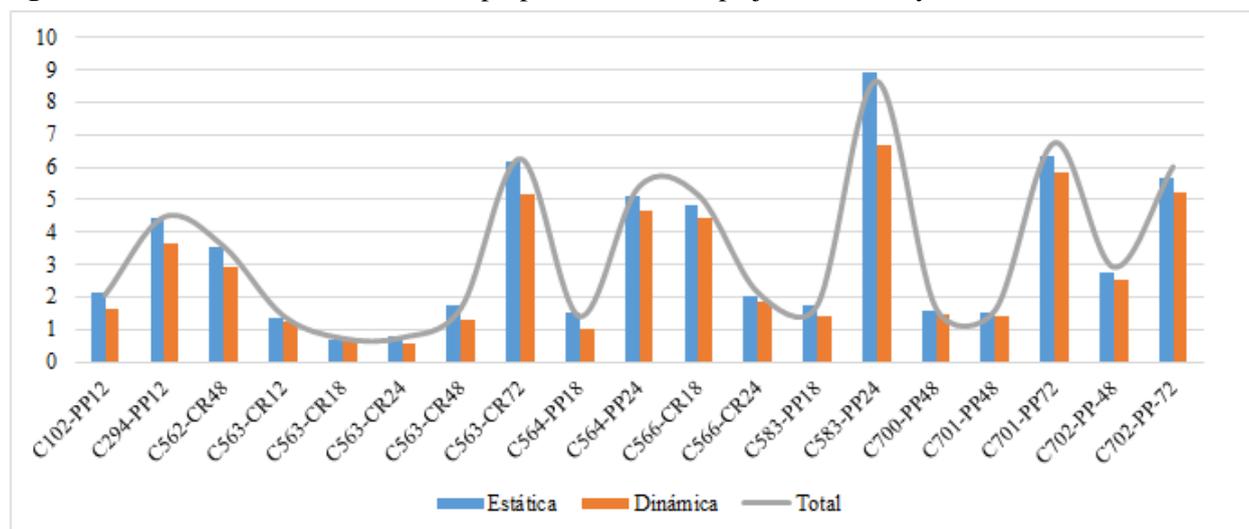
Figura 50. Resultado del método híbrido de la complejidad estática y dinámica



7.5.2 Resultados de acuerdo a estimaciones en variables del sistema

Basados en la variable aleatoria de la demanda de los productos, relacionando datos históricos, se calcula la complejidad estática y dinámica, a partir del nuevo método entrópico propuesto (Ecuaciones 10 y 11). La figura 51 evidencia una alta complejidad en las referencias de productos C564-PP24 y C583-PP24 los cuales están asociados a cintas adhesivadas de polipropileno (BOBPP) de 24 milímetros. También se destacan un alto comportamiento en las referencias con ancho de 72 milímetros tanto de tipo polipropileno como de papel. Cabe resaltar, que por ser la demanda una variable aleatoria externa no aplica el desarrollo de las ecuaciones 17 y 18, por lo que está orientada al producto mas no al proceso.

Figura 51. Resultado del nuevo método propuesto de la complejidad estática y dinámica



De acuerdo a los resultados, la propuesta de mejora para una reducción o eliminación de la complejidad desde el análisis de la variable aleatoria demanda debe estar orientada a (i) Una adecuada gestión de la demanda con técnicas de pronósticos cuantitativos, (ii) Buscar un equilibrio entre la oferta y la demanda y (iii) Integración entre los procesos de producción y mercadeo, con elementos de comunicación, coordinación y colaboración.

7.6 Conclusiones del capítulo

La aplicación del modelo en un sistema de manufactura Flow Shop (FS), busca aportar en el proceso de toma de decisiones a nivel táctico y operativo, considerando la configuración del proceso, la variedad de productos y la variable aleatoria de la demanda. El modelo es validado a partir de los datos de una empresa perteneciente al sector de manufactura, específicamente al subsector en fabricación de materiales plásticos y resinas, en la búsqueda del cálculo de la complejidad de cada estación de trabajo y de los productos. Los resultados evidencian una identificación de focos habilitadores para procesos de mejora, que permitan reducir o eliminar la alta complejidad tanto en unas estaciones de trabajo como en referencias de productos. La literatura plantea estrategias de solución abordadas en el capítulo 2, las cuales podrían ser aplicadas para mitigar los efectos producidos por la complejidad y a cabo se describe metodologías y herramientas fundamentadas en la administración de la producción y la gerencia moderna de operaciones. Cabe resaltar que el modelo propuesto considerado el tipo de proceso por producto, puede ser aplicado y adaptado a cualquier caso, independientemente del sector al que pertenezca ya que tiene en cuenta variables críticas de decisión.

Capítulo 8

Aplicación del modelo en sistema Job Shop (JS) y Make to Order (MTO)

8.1 Objetivo

- (OE5)- Validar el impacto del modelo y nueva métrica propuesta, que permita una evaluación y entendimiento actual del sistema, en casos de estudios del sector de manufactura de pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena – Colombia.

8.2 Caso de aplicación

El caso de aplicación va dirigido a una empresa de operaciones en la ciudad de Cartagena – Colombia, perteneciente al sector de manufactura, específicamente al subsector metalmecánico en la fabricación de productos elaborados de metal, excepto maquinaria y equipo. Para su ejecución se hace necesario conocer ampliamente el sistema, su estructura, proceso operativo y configuración. Los resultados que se obtienen se sitúan en el ámbito decisional del mediano y largo plazo, enmarcadas desde un ámbito de la gestión de la complejidad del sistema de manufactura. Por efectos de confidencialidad se reserva el nombre de la compañía participante.

8.2.1 Generalidades de la empresa

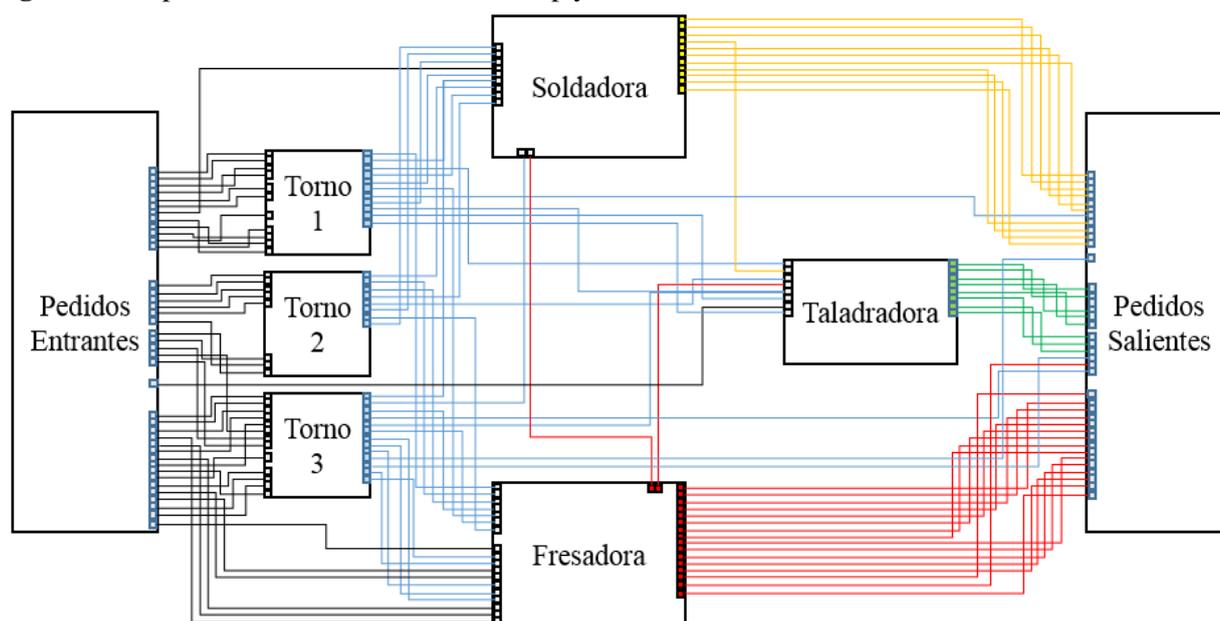
La empresa fue fundada en el año 1995, cuenta con más de 25 años en el mercado prestando los servicios de fabricación de piezas livianas y pesadas en materiales de aceros, bronce, hierro y aluminio con destino a las grandes empresas del sector industrial de Mamonal. Actualmente se encuentra incursionando en el mercado de reparación y mantenimiento de equipos hidráulicos y mecánicos, para esto cuentan con máquinas tipo tornos, fresadora, taladradora y soldadoras. Su misión es convertirse en aliados estratégicos de distinguidos clientes, además, de ser reconocida como una empresa innovadora, confiable y visionaria con una mano de obra calificada y una maquinaria con última tecnología, garantizando la total satisfacción de los clientes⁸.

8.2.2 Proceso de manufactura

En la figura 52 se puede apreciar la configuración del sistema de producción, teniendo en cuenta el agrupamiento de máquinas de acuerdo al proceso que realizan y una muestra de pedidos entrantes y salientes. Cabe resaltar que en este tipo de sistema la fabricación se desarrolla bajo pedido según especificaciones previas del cliente.

⁸ Tomado de la página web de la empresa

Figura 52. Representación del sistema Job Shop y Make To Order



Fuente: Elaboración propia

8.3 Características del sistema a modelar

A continuación se hace mención de algunas características tenidas en cuenta del sistema para su modelado:

- Cada estación de trabajo desarrolla un proceso en particular
- Un día laborado de operación consta de 8 horas, teniendo en cuenta el tiempo de preparación y alistamiento.
- En la jornada laboral existe un break o descanso laboral de 1,5 hora diaria.
- Antes de finalizar la jornada laboral existe un tiempo de inactividad de 0,5 horas por mantenimiento autónomo.
- La fabricación se desarrolla bajo pedido, donde una solicitud puede extenderse e diversas jornadas de trabajo.
- Un mes productivo consta de 24 días laborales, que involucra las paradas inesperadas por reparaciones mínimas y tiempos ociosos que se dan en el día a día de la operación.
- Los datos suministrados por la empresa comprenden el periodo anual del 2019.

8.4 Parámetros para el modelamiento

Mediante visitas a la empresa de forma periódica, la aplicación de entrevistas, se ha recopilado información suficiente como para poder desarrollar de manera global el modelo propuesto (ver figura 53). Algunos datos suministrados por la empresa son de carácter confidencial, para esto, se ha determinado trabajar con datos aproximados que permitan un acercamiento al sistema real y poder realizar los diferentes cálculos.

Figura 53. Recogida de datos e información en caso de estudio Job Shop y Make To Order

Fuente: Fotos propias tomadas en la empresa caso de estudio

8.4.1 Datos del instrumento aplicado

A continuación en la tabla 57 se muestran los datos obtenidos a partir del instrumento diseñado (ver anexo 1). Y de igual forma considerando las respuestas de cada uno de los responsables por cada estación de trabajo.

Tabla 57. Datos del instrumento aplicado en cada área de trabajo

	Q1			Q2			Q3			Q4			Q5			Q6								
Operador Torno 1	3	1	3	2	3	3	1	3	2	2	3	2	4	2	3	1	2	4	1	2	3	3	2	1
Operador Torno 2	3	3	2	3	2	1	3	2	3	3	2	3	3	2	2	1	3	2	1	1	3	3	2	2
Operador Torno 3	3	4	3	2	2	2	2	3	2	3	3	2	3	3	2	1	1	4	1	3	2	3	2	1
Operador Fresadora	3	3	1	2	3	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	3
Operador Soldadura	1	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2
Operador Taladro	3	3	3	2	2	2	2	3	1	1	2	2	1	1	1	2	3	2	2	3	2	2	1	3

8.4.2 Datos de información estática según el proceso

La tabla 58 muestra la información de trabajo de acuerdo al proceso, considerando que el sistema tiene una hora inicio a las siete y treinta (7:30) horas, luego un descanso a las doce (12:00) horas, retomando actividades a las trece y treinta (13:30) horas y terminando la producción a las diecisiete (17:00) horas.

8.4.3 Datos de información dinámica según el proceso

En la tabla 59 se muestran el tiempo acumulado de acuerdo al proceso, considerando un horizonte de tiempo de 12 días productivos, equivalente a medio mes de trabajo. Durante este periodo se tuvieron en cuenta los distintos estados en los diversos puntos en el tiempo.

Tabla 58. Información estática según el proceso

	Torno 1	Torno 2	Torno 3	Fresadora	Soldadura	Taladro
Operación	4,5	4,5	4,5	5,0	5,0	5,5
Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Setup	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
Ocioso	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Inactivo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Tabla 59. Información dinámica según el proceso

	Torno 1	Torno 2	Torno 3	Fresadora	Soldadura	Taladro
Operación	53,4	45,4	40,6	55,6	56,1	52,1
Break	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Setup	7,0	6,1	5,6	7,3	6,4	6,8
Ocioso	11,6	17,7	23,3	6,3	6,6	13,1
Inactivo	6,0	8,8	8,5	8,8	8,9	6,0

8.4.4 Datos reales de la variable horas de mantenimiento⁹

La tabla 60 muestra los tiempos ejecutados de acuerdo al proceso desarrollado, considerando un horizonte de tiempo de 12 meses. Durante este periodo se tuvo en cuenta el estado de inactividad, provocado por pérdidas de tiempo planificado y no planificado. Cabe resaltar que el tiempo planeado en cualquier estación y periodo corresponde a 12 horas.

Tabla 60. Información de la variable horas de mantenimiento

Mes	Tiempo Mantenimiento Ejecutado en Horas 2019					
	Torno 1	Torno 2	Torno 3	Fresadora	Soldadura	Taladro
1	12,0	13,3	13,0	12,0	14,2	13,1
2	12,8	12,0	14,5	13,8	12,0	12,0
3	12,0	14,9	13,0	14,5	12,0	12,0
4	12,5	13,2	14,7	13,9	12,0	12,6
5	12,0	14,9	12,0	12,0	12,0	12,2
6	12,7	14,5	12,0	12,0	12,0	12,0
7	12,0	13,4	14,8	14,5	12,0	12,0
8	12,0	12,0	12,0	13,4	12,0	12,0
9	12,5	12,0	13,2	12,0	13,4	12,9
10	12,0	13,1	12,0	12,0	14,5	12,0
11	12,5	12,0	15,0	12,0	14,7	12,0
12	12,0	14,8	12,0	14,9	12,0	13,3

⁹ Información suministrada por la compañía objeto de estudio

8.5 Resultados y análisis del modelo

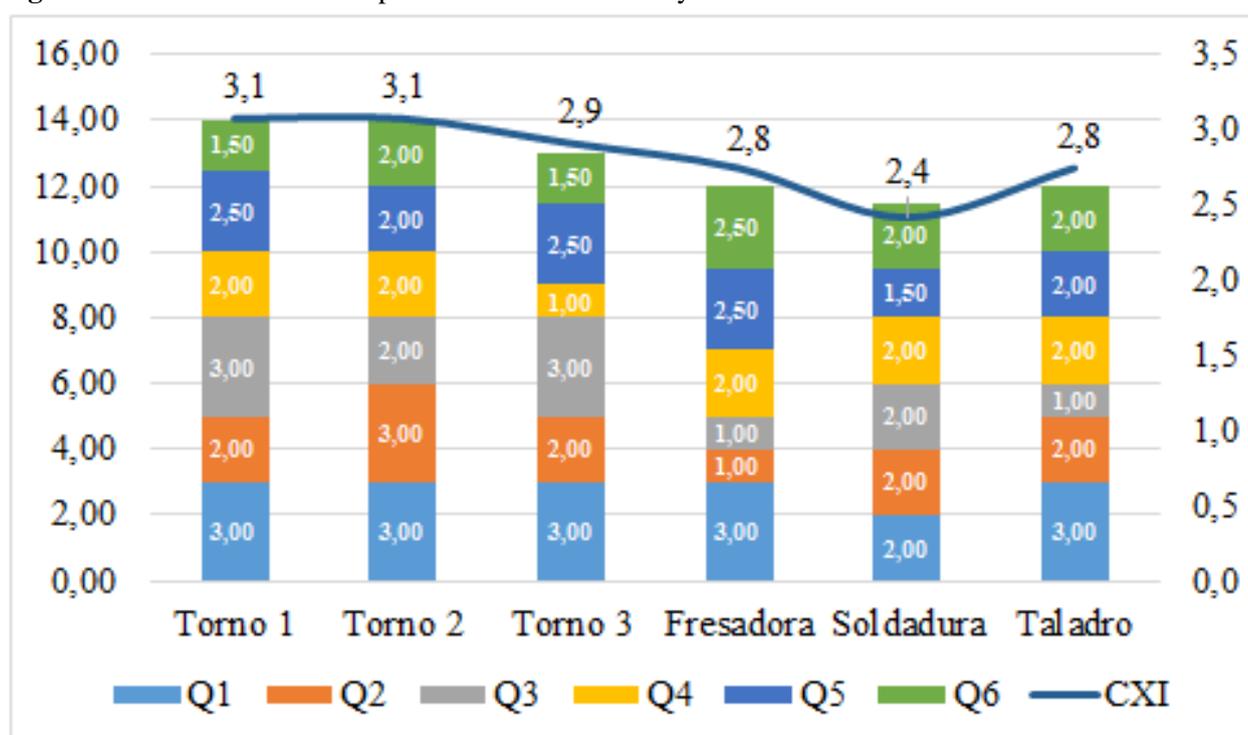
El modelo se solucionó a través del diseño conceptual planteado en el capítulo 6, y mediante el procesamiento de la información o datos suministrados en el ítem 8.4. Los resultados son una validación práctica de la propuesta de modelado y el análisis que se desarrolla evalúa el comportamiento del modelo.

8.5.1 Resultados de acuerdo a los distintos procesos

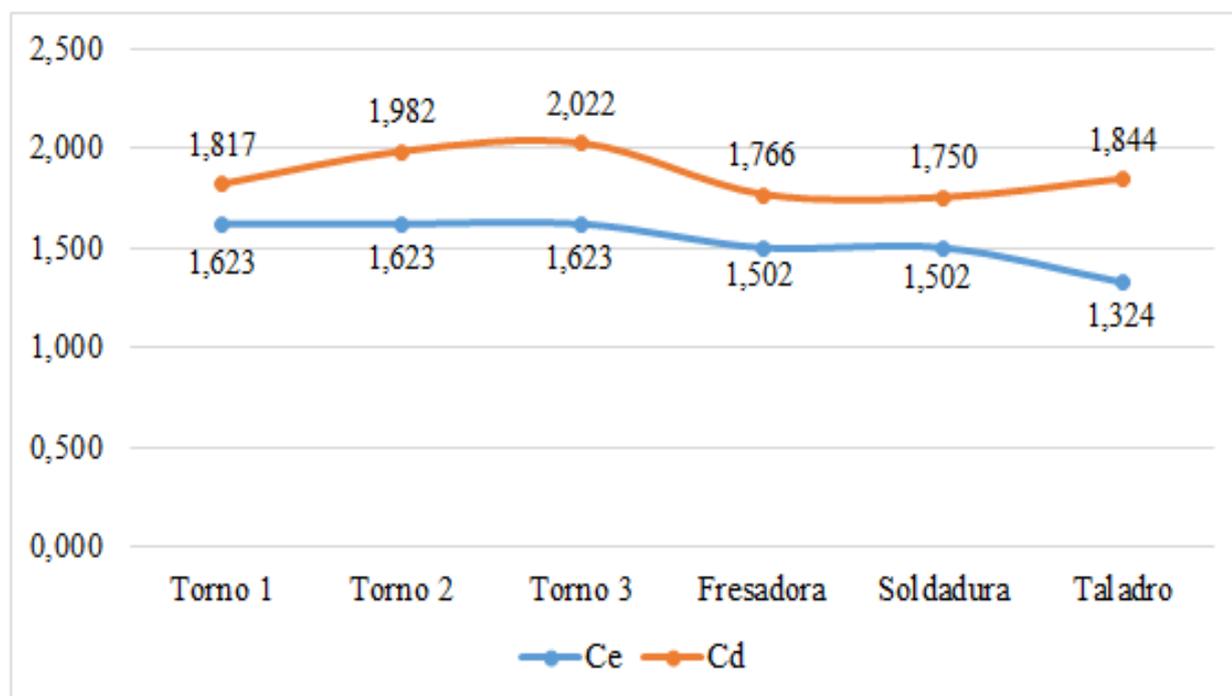
La figura 54 evidencia que se necesita un cambio urgente en el ítem (Q1) Referencia de productos, dado que genera una alta complejidad en los procesos de torneado, fresado y taladrado. De igual forma en el ítem (Q2) Contenido de trabajo, que comprende al torno 2. Por último, el ítem, (Q3) instrucciones de trabajo, focalizado en el torno 3.

Aplicando la Ecuación 9, en la figura 54 también se puede apreciar el resultado del índice de complejidad total (CXI) por procesos de trabajo, es evidente una alta complejidad en los procesos de torno 1 y torno 2, y en un bajo nivel el proceso de soldadura.

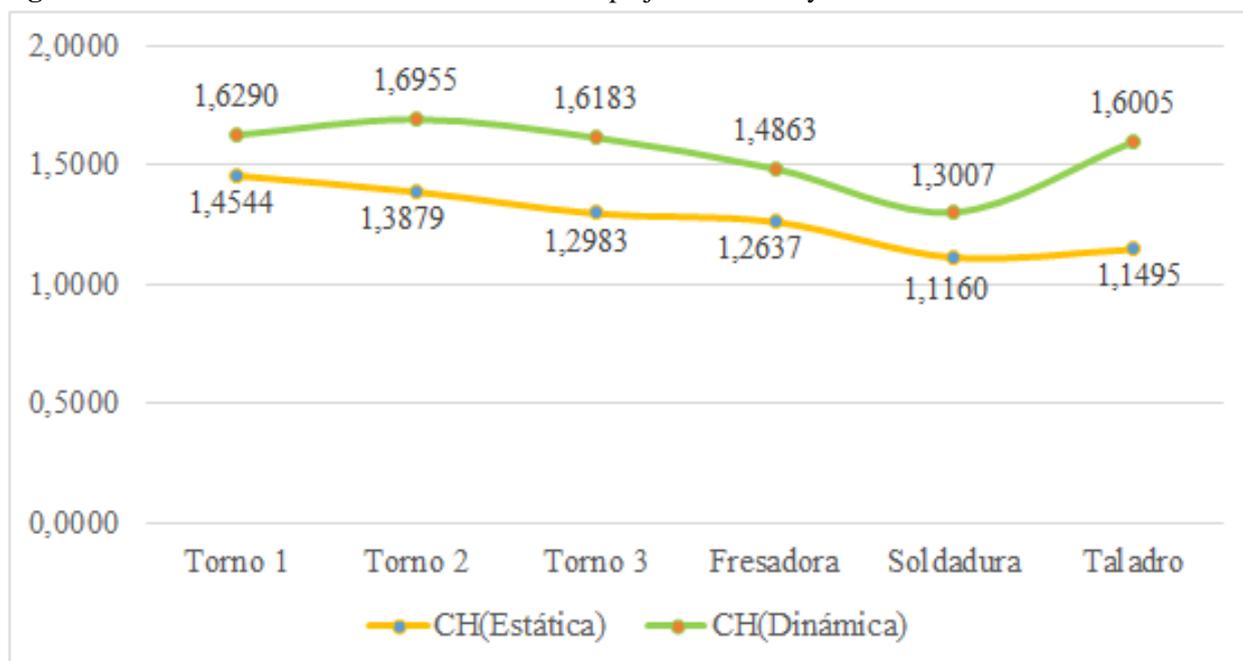
Figura 54. Resultado del CXIe por elementos evaluados y total CXI



A partir de la Ecuación 1 y Ecuación 2 se obtienen los cálculos entrópicos de la complejidad estática y dinámica (Ver anexo 6 y 7). La figura 55 evidencia una alta complejidad conjunta en los procesos de torno 3 y torno 2, y bajo índice en los procesos de fresado y soldadura. Con los resultados obtenidos son notorios algunos acercamientos y distanciamientos en varios procesos. Dado lo anterior se procede a la aplicación del modelo híbrido (Ver anexo 8), para un cálculo de manera consolidada (Ecuación 14 y 15).

Figura 55. Resultado entrópico de la complejidad estática y dinámica

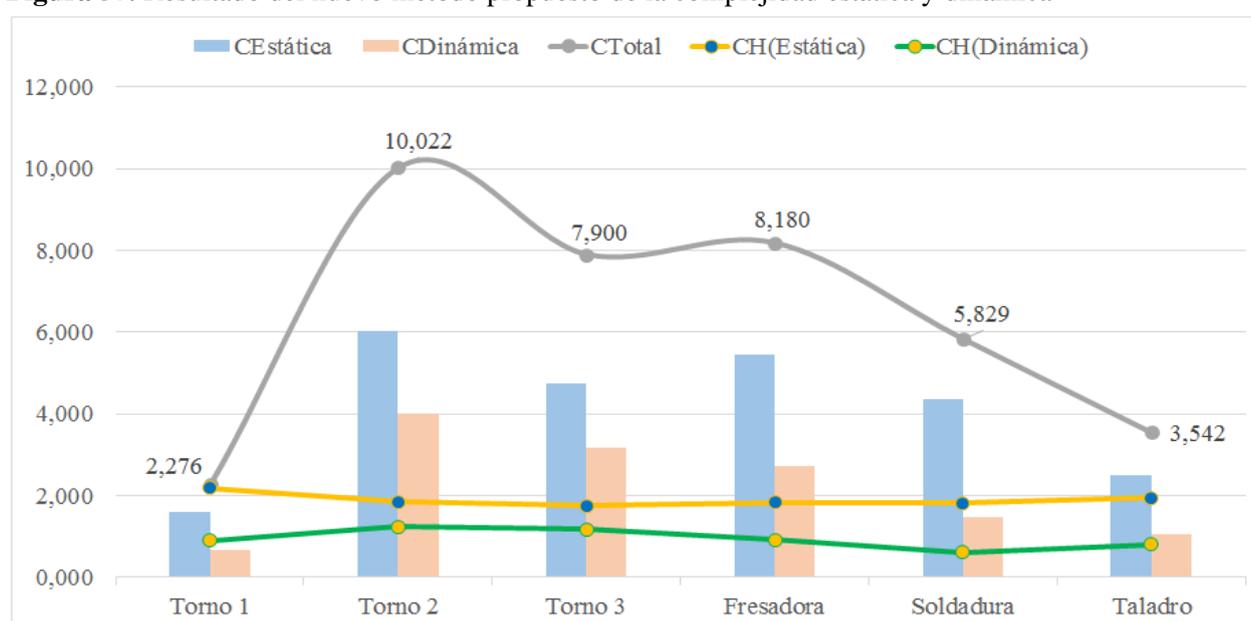
La figura 56 evidencia una alta complejidad estática y dinámica en el proceso de torneado, el cual está conformado por los tres (3) tornos. Convirtiéndose en un escenario propicio para procesos de mejora, que permitan reducirla o eliminarla. Para esto el Capítulo 2 plantea estrategias de solución, las cuales podrían ser aplicadas para mitigar los efectos producidos por la complejidad y a su vez describe metodologías y herramientas fundamentadas en la administración de la producción y la gerencia moderna de operaciones.

Figura 56. Resultado del método híbrido de la complejidad estática y dinámica

8.5.2 Resultados de acuerdo a estimaciones en variables del sistema

Basados en la variable aleatoria de tiempo por mantenimiento de las máquinas, relacionando datos históricos entre lo planeado y ejecutado, se calcula la complejidad estática y dinámica, a partir del nuevo método entrópico propuesto (Ecuaciones 10 y 11). La figura 57 evidencia una alta complejidad, específicamente en el torno 2 y en la fresadora. Cabe resaltar, que el tiempo por mantenimiento es una variable aleatoria interna orientada al proceso, por tanto es viable aplicar el desarrollo de las ecuaciones 17 y 18, que implica el cálculo de la complejidad en ambos tipos de forma híbrida. Los resultados siguen marcado una alta complejidad dinámica en las operaciones de torno 2, torno 3 y fresadora.

Figura 57. Resultado del nuevo método propuesto de la complejidad estática y dinámica



Por lo anterior, la propuesta de mejora para una reducción o eliminación de la complejidad teniendo en cuenta el tiempo por mantenimiento debe estar orientada a (i) Gestión del plan de mantenimiento preventivo, (ii) Estimación de frecuencia de fallas y minimización del tiempo reparación por medio de técnicas de pronósticos cuantitativos y optimización y (iii) Capacitación y entrenamiento de los operadores en detección de alertas tempranas sobre eventos importantes o inesperados.

8.6 Conclusiones del capítulo

La aplicación del modelo en el sistema Job Shop (JS) proporciona una visión amplia de los distintos procesos a partir de su configuración estructural y del comportamiento dinámico del sistema. El modelo es validado a partir de los datos de una empresa perteneciente al sector de manufactura, específicamente al subsector metalmeccánico en la fabricación de productos elaborados de metal, en la búsqueda del cálculo de la complejidad. Los resultados evidencian un claro espectro en donde se debe hacer gestión de mejora en pro de su reducción o eliminación. Cabe resaltar que este modelo puede ser aplicado y adaptado a cualquier caso de manufactura por procesos.

Capítulo 9

Gestión de la complejidad en sistemas de manufactura

9.1 Objetivo

- **(OE5)**- Validar el impacto del modelo y nueva métrica propuesta, que permita una evaluación y entendimiento actual del sistema, en casos de estudios del sector de manufactura de pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena – Colombia.

9.2 Introducción

En este capítulo se pone en práctica desde situaciones reales la gestión de la complejidad en sistemas de manufactura, específicamente en casos de aplicación de empresas del sector industrial en la ciudad de Cartagena – Colombia. Para esto se tienen en cuenta lo identificado en capítulos anteriores, respecto a las estrategias que se deben aplicar dependiendo del tipo de complejidad que se desea gestionar (ver tabla 4). De igual forma considerar las distintas metodologías y herramientas de gestión para la solución en sistemas de manufactura, las cuales dependen del campo de aplicación, como Administración de la Producción, Gerencia Moderna de Operaciones, Administración de la Calidad y Administración de la Cadena de Suministro (ver tabla 5). Cabe resaltar que para el abordaje de este capítulo, se trabajó en forma conjunta con dos (2) proyectos de investigación alineadas a tesis de maestría, donde el autor principal de esta tesis doctoral figura como director principal. Por efectos de confidencialidad se reserva el nombre de las compañías participantes y se desglosa resumen, problemática, estrategia de solución y conclusiones.

9.3 Proyectos alineados de investigación

- **(PR11)**: Ramos Darwin & Herrera Vidal, G., (2022). Modelación Matemática para la Planificación Agregada de la Producción-Distribución Ligada a la Complejidad Estática bajo un Enfoque Determinístico y Estocástico. Tesis de Maestría. (Culminada), Artículo de investigación (En desarrollo).
- **(PR12)**: Ubaldo Calle & Herrera Vidal, G., (2022). Modelo Multiobjetivo para la Planificación de las Operaciones con Consideraciones de Fuentes de Complejidad Estática y Dinámica. Caso de Aplicación Empresa Camaronera. Tesis de Maestría. (Culminada) Artículo de investigación (En desarrollo).

9.4 Descripción del primer proyecto

9.4.1 Titulo

Modelación Matemática para la Planificación Agregada de la Producción-Distribución Ligada a la Complejidad Estática bajo un Enfoque Determinístico y Estocástico.

9.4.2 Resumen

En este proyecto se presenta un modelo de optimización de producción-distribución para empresa del sector plástico, basado en el modelamiento matemático con enfoques determinístico y estocásticos de la variable demanda, de manera que facilite el proceso de planificación y operación de la producción y promueva soluciones a problemas del contexto industrial. La metodología usada para el desarrollo es la utilización de técnicas de la programación lineal entera mixta y la utilización de escenarios para gestionar de incertidumbre. Se hace una comparación entre los modelos cuantitativos donde se obtuvieron las cantidades óptimas para producir y maximizar los beneficios de la empresa, lo que a su vez se refleja en resultados satisfactorios en la planificación de la producción y distribución.

9.4.3 Descripción del problema

La problemática a resolver nace de la necesidad de realizar una planificación de la producción-distribución en la empresa caso de estudio, en la cual existe un alto grado de incertidumbre que se magnifica desde su cadena de suministros hasta su proceso de fabricación, iniciando con los abruptos cambios en la demanda regional y global de la compañía. La empresa en su totalidad está constituida por 9 divisiones, correspondientes en 16 líneas integradas por 5 líneas de comercialización y 11 de fabricación aportando 2150 referencias. Las operaciones de producción son ejecutadas por un total de 31 personas, mientras en la distribución se cuentan con 4 personas realizando operaciones de separación, alistamiento y despacho de pedidos. La capacidad en las líneas de fabricación es limitada por el número de turnos de trabajo asignados, cada turno de trabajo corresponde a 9.5 horas.

La planificación se desarrolla basada en las referencias de productos en la línea de producción, donde se calcula el promedio de cada una que más se ajuste al plan de ventas, ya sea por estrategia de cubrimiento o penetración, en base a esto se calcula la duración del plan tanto en materiales (Gestión de Requerimientos de Materiales) como en tiempos (Turnos). Por consiguiente, este problema se enmarca en ambientes de múltiples productos, múltiples periodos, capacidad limitada de producción y almacenamiento, flota subcontratada con exclusión de zonas, incertidumbre en la demanda. Teniendo en cuenta lo anterior, el proyecto busca que la planificación sea robusta a los cambios en la demanda, ante todo para la complejidad en las planificaciones de operaciones de producción y distribución, planteando como estrategias la reducción de productos y referencias por familias (Complejidad Estáticas) y Gestionado la demanda a partir de técnicas de pronósticos (Complejidad Dinámica).

9.4.4 Estrategia de solución

Para el modelamiento matemático se evaluaron dos planteamientos uno con enfoque determinístico y otro estocástico con incertidumbre en función a la demanda, con una topología de tres proveedores, seis tipos de materias primas, seis productos, dos plantas, dos recursos de producción, dos centros de distribución, cinco detallistas y tres clientes. En la cual se tomaron decisiones útiles para la planificación de operaciones que integran decisiones de compras, producción, transporte y niveles de inventario en todo el sistema.

Inicialmente se desarrolla una caracterización del proceso y se identifican las variables de estudio de complejidad en el sistema, destacando la demanda, las ordenes de pedidos y las cantidades despachadas. Basado en esto se recopila la información y se desarrollan los cálculos de medición entrópica. Para la construcción del modelo matemático se diseña el modelo conceptual, y se estructuran los conjuntos conformados por Proveedores (s), Materias primas (m), Productos (i), Plantas (p), Recursos de producción (q), Centros de distribución (d), Detallistas (r), Clientes (c) y Periodos (t).

De igual forma se establecen los parámetros del modelo los cuales están asociados a Precios, Costos de fabricación, Costos de transporte, Costos de inventarios, Costos por defectuosos, Niveles de capacidad, Tiempo de transporte, Costos por cambios de recursos de planta, Tasa de detección de artículos defectuosos, Costos por subcontratación, Costos por manipulación de unidades y demanda del cliente de un determinado producto. Se declaran las variables de decisión, las cuales están relacionadas con Cantidad de materia prima, Cantidad a subcontratar, Cantidad a producir, Niveles de inventarios y Cantidad a transportar. Y por último se formula la función objetivo de utilidad sujeto a unas restricciones de compra, producción, transporte, inventario y demanda.

Para la solución del modelo, se utilizó el programa GAMS (General Algebraic Modeling System) y de esta manera determinar en forma óptima los valores de la función objetivo, como también de las variables del modelo. Con la versión GAMS 23.6.5 con el Solver CPLEX 12.2.0.2 diseñado para resolver problemas grandes y difíciles rápidamente y con una mínima intervención del usuario. El equipo de computación empleado en la implementación, ejecución del programa fue un ASUS VivoBook X442U, procesador Intel(R) Core (TM) i5-8250U @ 1.60GHz 1.80GHz, 8.00GB de memoria RAM con un sistema operativo de 64 bits WINDOWS 10 Home single.

9.4.5 Conclusiones

El modelo propuesto busca aportar en el proceso de toma de decisiones a nivel táctico y operativo, como la cantidad a comprar y transportar, las cantidades a producir, las ventas a efectuar y los niveles de inventario requeridos para una mayor utilidad en la empresa foco y los demás agentes. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, el modelo estocástico presenta un mejor rendimiento en cada uno de los escenarios planteados en la variable demanda, en relación con el modelo determinístico. Cabe resaltar que el modelo matemático puede ser aplicado y adaptado a cualquier ambiente productivo al que pertenezca debido a la integración de variables críticas de decisión.

9.5 Descripción del segundo proyecto

9.5.1 Titulo

Modelo Multiobjetivo para la Planificación de las Operaciones con Consideraciones de Fuentes de Complejidad Estática y Dinámica. Caso de Aplicación Empresa Camaronera.

9.5.2 Resumen

El objetivo del proyecto consiste en diseñar un modelo multiobjetivo de planificación de las operaciones en la empresa camaronera, con consideraciones de fuentes de complejidad en sistemas de manufactura. La investigación es de tipo aplicada, basada en teorías respecto a investigación de operaciones, optimización y complejidad en sistemas de manufactura. Metodológicamente, se hizo necesario una revisión de literatura sobre las temáticas mencionadas, la caracterización del sistema productivo, la medición de la complejidad desde distintos enfoques y la construcción y solución del modelo matemático. Los resultados obtenidos evidencian una solución óptima para minimizar los costos totales de las operaciones de producción- transporte y tiempos de alistamiento, a su vez una respuesta a cada una de las variables de decisión planteadas en el modelo.

9.5.3 Descripción del problema

La empresa Camaronera caso de estudio se encuentra ubicada en la ciudad de Cartagena, en la zona industrial de mamonal, dedicada al cultivo, procesamiento y comercialización de camarón. Cuenta con 1.052 hectáreas en cultivos y con una planta de procesos capaz de procesar más de 7.000 toneladas anuales de camarón. Su principal mercado es el europeo, mediante canales de distribución de grandes superficies y mayoristas.

En la empresa caso de estudio el proceso de producción presenta inconvenientes desde distintas perspectivas, en cuanto a la materia prima, el crecimiento del camarón se ha visto afectado por factores como la sequía, lluvias, oxígeno, el terreno, el agua, la temperatura, alimentación, entre otros. Impactando directamente en la planeación de la producción, provocando como problemas faltantes en dicho recurso, lo que ocasiona incumplimiento de los pedidos a los clientes, sobre costos y en algunos casos de pérdidas por calidad del producto.

9.5.4 Estrategia de solución

Para la construcción del modelo conceptual del problema objeto de estudio, se tuvieron en cuenta dentro del sistema de producción, las etapas del proceso productivo, los conjuntos asociados, de igual forma todos los elementos que intervienen como es el caso de las materias primas, líneas de producción y los productos. (Ver Figura 10).

En el sistema de producción del caso de estudio intervienen “p” piscinas, una planta tres tipos de transportes (t) desde las piscinas hasta la planta, una planta con tres tipos de familias de productos (i), para ser producidos durante un periodo de tiempo (s).

Los parámetros del modelo están ligados con las limitaciones de capacidades, costos de producción y operación, costo de transporte, tiempos de alistamientos y tiempo de transporte y las variables del modelo están ligadas a las cantidades que se deben producir en la finca, en la planta, los niveles de inventarios que se deben tener de cada uno de los productos, las cantidades que se deben producir en cada una de las líneas de producción.

Para el desarrollo del modelo matemático se hizo necesario una etapa preliminar o fase exploratoria, para entender el contexto que enmarca el problema planteado y la caracterización del proceso productivo caso de estudio de la empresa Camaronera. De igual forma se exploraron modelos de planificación de operaciones desarrollados por otros investigadores, los cuales sirvieron de referencia.

La formulación de la función objetivo consiste en la minimización de los costos totales de las operaciones de producción y transporte. Se destacan dos (2) objetivos fundamentales: (i) Desde el punto de vista del factor económico se busca la minimización de los costos de operación y (ii) Desde una perspectiva técnica la minimización de los tiempos de alistamiento (Complejidad estática).

Factor Económico ~ Función Objetivo (1) = Min Z Costos totales
Factor Técnico ~ Función Objetivo (2) = Min Z Tiempos de Alistamiento

La función objetivo (1) representa la forma de minimizar los costos de operación (Obj1), los cuales están representados en costos de producción y transporte. La función objetivo (2) muestra la forma de minimizar los tiempos de alistamiento (Obj2), se encuentra conformado por el tiempo de alistamiento y preparación en las piscinas, tiempo de transporte (t) tiempo de alistamiento en el área de empaque. Las restricciones representan las limitaciones de los recursos utilizados en el modelo de optimización. Estas están asociadas con las capacidades, de equilibrio y de configuración del sistema. Cabe resaltar que todo lo que se produce en las piscinas se procesa en la planta y se exporta, por tanto no se generan inventarios.

Los métodos utilizados para realizar la optimización multiobjetivo, corresponde a Método de suma ponderada, lexicográfico y método de restricción de épsilon. Y su solución partió de la ayuda del software GAMS (General Algebraic Modeling System), como su nombre lo indica es un lenguaje de modelización, más que un programa para resolver problemas de optimización. Se utiliza para suplir dos necesidades: modelar problemas de optimización tanto lineales, no lineales y mixtos, y realizar programación matemática. Entre las ventajas se tiene que el sistema es especialmente útil para solucionar problemas que sean grandes y complejos, permite construir modelos de gran tamaño que se pueden adaptar rápidamente a nuevas situaciones. En forma general el modelo se corrió en un equipo con características de 4,00 GB de memoria RAM y un sistema operativo de 32 bits con Windows 7.

Con la aplicación de estos tres métodos, se lograron obtener soluciones óptimas ante un problema

multiobjetivo con consideraciones de costos de operación (Complejidad dinámica) y tiempos de alistamiento (Complejidad estática), donde la mejor solución se obtiene mediante el método de lexicográfico para ambas funciones. Dado lo anterior, cabe destacar que la gestión de las operaciones necesita de una buena planificación de las operaciones para brindar apoyo en la toma de decisiones. Es aquí donde toma importancia los resultados obtenidos del modelo multiobjetivo propuesto para la empresa Camaronera, dado que permite una coordinación en la gestión de las operaciones de la producción y logística obteniendo una solución al problema abordado y mejorando las medidas ligadas con la complejidad de manufactura.

9.5.5 Conclusiones

El diseño de un modelo de optimización multiobjetivo para la planificación de las operaciones con consideraciones de fuentes de complejidad estática y dinámica en la empresa Camaronera. Permite poder solventar la problemática que actualmente se está presentando a raíz de inconvenientes desde distintas perspectivas, en cuanto a la materia prima, el crecimiento del camarón se ha visto afectado por factores climáticos los cuales impactan en la planeación de la producción, provocando como problema faltantes en dicho recurso, lo que ocasiona a la empresa incumplimiento de los pedidos a los clientes, sobrecostos y en algunos altos tiempos en alistamientos para la puesta en marcha de los subproductos y productos.

La aplicación de nuevas metodologías enmarcadas en la medición de la complejidad en sistemas de manufactura resulta ser un elemento innovador en el tema de modelización matemática para la gestión de las operaciones. Debido a que impactan en los costos operacionales e indicadores de desempeño relacionados con producción, tiempos, velocidad de producción y productividad. Por tanto es de vital importancia, identificarla y medirla cuantitativamente, de modo que pueda ser evitada, reducida o eliminada.

9.6 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se describieron dos tipos de proyectos, donde se llevaron a cabo procesos de gestión de la complejidad en sistemas de manufactura, a partir del modelamiento matemático con técnicas de optimización. Ambos asociados a la planeación de producción, con consideraciones estáticas respecto a las cantidades de productos y a los alistamientos (Setup). Y dinámicas, dado la presencia de incertidumbre en variables aleatorias como la demanda y cantidad de materia prima. Para su solución se utilizó la herramienta informática de GAMS, lo que permitió poder encontrar el mejor rendimiento a las funciones objetivos y óptima respuesta a las variables de decisión.

Capítulo 10

Conclusiones Generales

10.1 Introducción

La presente tesis doctoral ha intentado dar respuestas a unas hipótesis planteadas y solventar brechas entre la teoría y la practicidad respecto a la medición de la complejidad en sistemas de manufactura. Para esto se hizo necesario el cumplimiento de un objetivo general enmarcado en el diseño de un modelo con aplicabilidad en los distintos subsectores económicos, que facilite una visión más amplia en los sistemas de manufactura, aportar al proceso de gerenciamiento y la asertividad en la toma de decisiones. Este capítulo final trata de sintetizar las conclusiones alcanzadas tras la realización del proyecto y marcar los caminos a emprender en futuras investigaciones académicas.

10.2 Contribuciones

Inicialmente en la literatura revisada se desarrolla una contribución sustancial al campo del conocimiento, porque se aportan estrategias o mecanismos a las mediciones de la complejidad dinámica y mixta, evento que ha sido escasamente explorado, debido a la complicación en el seguimiento de las variables en el tiempo.

Adicional a esto, se estructuró una metodología apropiada para identificar los efectos y factores que generan complejidad en el proceso de manufactura de diferentes subsectores económicos, permitiendo así encontrar técnicas, métodos e indicadores para una propuesta de solución. De igual forma otra metodología basada en el análisis estadístico para determinar la relación existente entre las características y elementos de un sistema con respecto a la complejidad.

Entre las contribuciones más importante de esta investigación para el desarrollo de la medición de la complejidad en sistemas de manufactura, se destaca la propuesta de un modelo conceptual que establece un nuevo método de medición entrópica e híbrida, siendo este un aporte a la gestión estratégica o administrativa en los entornos empresariales, que permite lograr una mayor competitividad en mercados globalizados.

Por último, sobresale la contribución de tipo investigativa hacia la comunidad científica, respecto a la divulgación de los resultados de esta tesis doctoral. Enmarcada en la publicación de ocho (8) artículos en revista de alto impacto internacional, en base de datos Scopus y WOS, adicional dos (2) capítulos de libros publicados en la serie de textos tipo Springerlink y socializados en evento internacional Suscom 2021 en Jaipur, Rajasthan – India.

10.3 Conclusiones finales

La revisión de la literatura permitió estudiar la complejidad en sistemas de manufactura de manera amplia y concreta, a partir de mecanismos sistemáticos que lograron entender sobre la conceptualización, tipificación, fuentes de complejidad, los distintos enfoques y métodos, y por último los modelos que se pueden utilizar para su estudio y análisis. En síntesis, se demostró que la teoría de la complejidad está inmersa en los sistemas de manufactura, debido a la alta variedad, diversidad e incertidumbre en cada uno de sus componentes y etapas. Permitiendo tener un espectro de cada uno de los enfoques y métodos encontrados, identificando caminos hacia futuros retos. De manera particular se puede concluir que existe un alto interés por parte de la comunidad científica hacia la temática abordada, principalmente en el estudio estructural de los sistemas y su incertidumbre, encontrando un alto predominio de los modelos hacia la complejidad estática y escaso desarrollo hacia la complejidad dinámica y mixta. Poco desarrollo hacia elementos clave para la medición como las personas (Pe), los productos (Pd), la planificación y la programación (Ps), y desde una vista geográfica alto grado de escasez de estudios de complejidad en países latinoamericanos como Colombia, Argentina, Chile, Ecuador y entre otros.

La complejidad proviene de factores que producen un efecto en el desempeño de los sistemas de manufactura. Para esto presentó un estudio metodológico fundamentado en un instrumento desarrollado por la Universidad de Bayreuth de manera integral en el sector de manufactura en la ciudad de Cartagena – Colombia, tomando como muestra las pequeñas y medianas empresas (Pyme) en la industria manufacturera. Dado lo anterior se pudieron identificar los efectos más representativos en cada uno de los subsectores y los elementos con mayor impacto en sector manufacturero en materia de la complejidad. De igual forma, se identificaron los factores de generación de complejidad por origen y por tipo. Los resultados evidencian un alto volumen de factores desde un ámbito interno de fabricación, un mayor efecto en elementos del sistema productivo como las personas y el producto, y escenarios habitadores de mejora ligados a filosofías de lean manufacturing y técnicas de modelamiento. También se hizo un análisis estadístico, los resultados obtenidos permitieron identificar las características vinculadas a la alta complejidad y corroborar hipótesis planteadas, donde se corrobora que no existen diferencias significativas al comparar los subsectores económicos, así como con los tipos de operación por orden de pedido (Make to Order - MTO) y para almacenar (Make to Stock - MTS) y que ambos generan una alta complejidad. Sin embargo, al comparar los tipos de procesos, el tipo producto (Flow Shop - FS) tiene un mayor impacto en la complejidad, sin dejar a un lado el tipo por procesos (Job Shop - JS) que también sobresale.

Dado lo anterior, se desarrolla experimentalmente la medición de la complejidad estática, dinámica y total, basados en la entropía de Shannon, considerando diferentes estructuras y factores en un ambiente tipo flow shop (FS) e híbrido (H). Se desarrolla inicialmente el modelamiento estructural teniendo en cuenta 256 posibles combinaciones en una configuración de tres etapas y como máximo dos máquinas en cada una. Permitiendo un análisis respecto a los indicadores de desempeño, estadístico experimental y factorial. Los resultados obtenidos corroboran las hipótesis planteadas, donde estadísticamente los factores diseño estructural y la variación del tiempo de producción por etapa, influyen significativamente en la variable respuesta. Infiriendo que a mayor cantidad del

número de máquinas en las distintas etapas, mayor será la complejidad total. A su vez cuando los tiempos varían en forma progresiva de mayor a menor se genera una menor complejidad total. De igual forma se evidencia la existencia de correlación entre los indicadores y la variable estudiada, en el que sobresale la incidencia con los costos de producción (Cp) y otros indicadores como productividad (Pr), Productos terminados (Pt), Velocidad de producción (Th) y Productos en procesos (Wp).

Ante todo lo abordado, estudiado y analizado, teniendo en cuenta (i) Tendencia alta hacia mediciones de la complejidad estática y una baja proyección hacia la complejidad dinámica, (ii) Considerando los métodos del enfoque de Teoría de la información (IT), el menos abordado es Entropía de Shannon (SE) y E-Machines (EM), siendo el más favorable el primero, dada su aplicabilidad en entornos generales o sistemáticos. (iii) Los métodos desde el punto de vista de Otros enfoques (OA), sobresalen los de tipo Cuestionarios (Q) como los de mayor aplicabilidad o uso por los investigadores. (iv) En los métodos del enfoque de Índice cuantitativo (QI), el más favorable es Índice de complejidad (CXI), dado que el único de tipo cualitativo y que a su vez emplea la técnica anterior descrita como los Cuestionarios (Q). (v) La mayor inclinación hacia métodos objetivos, analíticos y modelos matemáticos, fundamentados en técnicas de optimización, algoritmos y simulación de procesos y (vi) La identificación de algunas características, inconvenientes o deficiencias en las métricas clásicas y extendidas. Se desarrolla un modelo conceptual y un nuevo método entrópico que sirva de apoyo a la aplicación de modelos matemáticos y a los tomadores de decisiones para un mayor entendimiento procedimental. Su construcción se visiona desde tres miradas, una física, funcional y otra informacional, lo que permite una claridad de los elementos y características fundamentales en la medición de la complejidad, desde una perspectiva subjetiva con el método Complexity Index (CXI) y objetiva con el método entrópico de Shannon, conllevando finalmente a la generación de un método Híbrido (H). La evaluación fue satisfactoria ya que permitió corroborar las hipótesis planteadas (H8) y (H9). Cabe resaltar que el método híbrido (H) propuesto toma relevancia dado que combina información proveniente de las personas, de la configuración del sistema y lo planificado o programado, fundamento que resulta útil en sistemas de manufactura e inclusive para escenarios futuros como los de servicios.

Tomando como base la información y parámetros suministrados por empresas participantes, se hizo una aplicación del modelo propuesto para la medición de la complejidad en dos casos de estudios (i) Dirigido a una empresa de operaciones en la ciudad de Cartagena – Colombia, perteneciente al sector de manufactura, específicamente al subsector en fabricación de materiales plásticos y resinas con un sistema Flow Shop (FS) y Make to Stock (MTS) y (ii) En una empresa de la misma ciudad, específicamente en el subsector metalmeccánico en la fabricación de productos elaborados de metal, excepto maquinaria y equipo, con sistema Job Shop (JS) y Make to Order (MTO). El modelo se solucionó a través del diseño conceptual, los resultados obtenidos son una validación práctica de la propuesta de modelado y el análisis que se desarrolla evalúa su comportamiento. En ambos casos, se identificaron focos habilitadores para procesos de mejora, que permitan gestionar, reducir o eliminar la alta complejidad tanto en estaciones de trabajo, referencias de productos, procesos de fabricación y gestión de variables aleatorias como la demanda o tiempo por mantenimiento de máquinas. A su vez se pudo concluir que el modelo propuesto puede ser aplicado y adaptado a

cualquier caso, independientemente del sector ya que tiene en cuenta variables críticas de decisión.

Finalmente, se aborda un capítulo específico de gestión de la complejidad en sistemas de manufactura, en el que se describieron y analizaron dos tipos de proyectos, a partir del modelamiento matemático con técnicas de optimización. Ambos asociados a la planeación de producción, con consideraciones estáticas respecto a las cantidades de productos y a los alistamientos (Setup). Y dinámicas, por la presencia de incertidumbre en variables aleatorias como la demanda y cantidad de materia prima. Su solución permitió poder encontrar el mejor rendimiento a las funciones objetivos y optima respuesta a las variables de decisión.

10.4 Trabajos Futuros

El modelo propuesto e implementado para la medición de la complejidad en sistemas de manufactura, deja grandes oportunidades para futuras investigaciones entre las cuales se proponen, (i) Realizar un estudio exploratorio de factores y efectos de complejidad teniendo en cuenta sistemas de servicios. (ii) Aplicar el modelo en sistemas de servicios, y comparar los resultados con indicadores de costos de atención, tiempo en cola, tiempo en el sistema, longitud de cola y ocupación de los servidores. (iii) Considerar en las mediciones otro tipo de variables aleatorias asociadas al tiempo por ausentismos y baja calidad. (iv) Aplicar el modelo en ambientes tipo proyectos (Fixed Position - PR) y por pedido (Make to Order – MTO).

Bibliografía

- [1] Quirk, M. (1999). *Manufacturing, Teams, and Improvement: The human art of manufacturing*. Prentice-Hall
- [2] Tanner, J. P. (1990). *Manufacturing Engineering: An Introduction to the Basic Functions, Revised and expanded (Vol. 36)*. CRC Press.
- [3] L. Gaio, F. Gino, and E. Zaninotto, "I sistemi di produzione". Edizioni Carocci, Roma. 2002.
- [4] Deshmukh, A. V., Talavage, J. J., & Barash, M. M. (1998). Complexity in manufacturing systems, Part 1: Analysis of static complexity. *IIE transactions*, 30(7), 645-655.
- [5] Companys, R. (2003). *Teoría de la decisión*. Cpda-ETSEIB. Intangible Capital. Barcelona, España, 3, 369.
- [6] Boisot, M., & Child, J. (1999). Organizations as adaptive systems in complex environments: The case of China. *Organization Science*, 10(3), 237-252.
- [7] Salom, G., & Shulterbrandt, S. (2012). Las microempresas, las Pymes y Latinoamérica. In *Revista Inter Forum*. Consultado el (pp. 12-10).
- [8] Wolff, J.; Pett, T. Small-firm performance: modeling the role of product and process improvements. *Journal of Small Business Management*, 2006, vol. 44, no 2, p. 268-284. DOI: 10.1111/j.1540-627X.2006.00167.x
- [9] Escobar, A.; Velandia, G., Hernández, P. *Gestión del conocimiento e innovación en las PYME exportadoras del sector industrial en Colombia*. 2017.
- [10] Pine II, B.; Hull, R. Mass customization: the new frontier in business competition. *R and D Management*, 1995, vol. 25, no 2, p. 254.
- [11] Papakostas, N.; Papachatzakis, P.; Xanthakis, V.; Mourtzis, D.; and Chryssolouris, G. An approach to operational aircraft maintenance planning. *Decision Support Systems*, 2010, vol. 48, no 4, p. 604-612. DOI: 10.1016/j.dss.2009.11.010
- [12] Herbert, S. The architecture of complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 1962, vol. 106, no 6, p. 467-482. DOI: 10.2307/985254
- [13] Flynn, B.; Flynn, E. Information-processing alternatives for coping with manufacturing environment complexity. *Decision Sciences*, 1999, vol. 30, no 4, p. 1021-1052. DOI: 10.1111/j.1540-5915.1999.tb00917.x
- [14] Calinescu, A.; Efstathiou, J.; Bermejo, J.; Schirn, J. Assessing decision-making and process complexity in a manufacturer through simulation. *IFAC Proceedings Volumes*, 1997, vol. 30, no 24, p. 149-152
- [15] Manuj, I., & Sahin, F. (2011). A model of supply chain and supply chain decision-making complexity. *International journal of physical distribution & logistics management*.
- [16] Perona, M., & Miragliotta, G. (2004). Complexity management and supply chain performance assessment. A field study and a conceptual framework. *International journal of production economics*, 90(1), 103-115.
- [17] Wu, Y., Frizelle, G., Ayral, L., Marsein, J., Van de Merwe, E., & Zhou, D. (2002). A simulation study on supply chain complexity in manufacturing industry. In *Proceedings of the Conference of the Manufacturing Complexity Network*. University of Cambridge.
- [18] Jacobs, M. A. (2007). Product complexity: a definition and impacts on operations. *Decision Line*, 38(5).
- [19] Efthymiou, K., Mourtzis, D., Pagoropoulos, A., Papakostas, N., & Chryssolouris, G. (2016). Manufacturing systems complexity analysis methods review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(9), 1025-1044.
- [20] Coronado Hernández, J. R. (2016). Análisis del efecto de algunos factores de complejidad e incertidumbre en el rendimiento de las Cadenas de Suministro. Propuesta de una herramienta de

- valoración basada en simulación (Doctoral dissertation).
- [21] Chedid, J. A., & Vidal, G. H. (2012). Análisis del Problema de Planificación de la Producción en Cadenas de Suministro Colaborativas: Una Revisión de la Literatura en el Enfoque de Teoría de Juegos.
- [22] Bozarth, C. C., Warsing, D. P., Flynn, B. B., & Flynn, E. J. (2009). The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance. *Journal of Operations Management*, 27(1), 78-93
- [23] MacDuffie, J. P., Sethuraman, K., & Fisher, M. L. (1996). Product variety and manufacturing performance: evidence from the international automotive assembly plant study. *Management Science*, 42(3), 350-369.
- [24] Wu, Y., Frizelle, G., & Efstathiou, J. (2007). A study on the cost of operational complexity in customer-supplier systems. *International Journal of Production Economics*, 106(1), 217-229
- [25] Sivadasan, S., Efstathiou, J., Calinescu, A., & Huatuco, L. H. (2006). Advances on measuring the operational complexity of supplier-customer systems. *European Journal of Operational Research*, 171(1), 208-226
- [26] Bick, W., & Drexl-Wittbecker, S. (2008). *Komplexität reduzieren: Konzept. Methoden. Praxis. LOG_X*, Stuttgart.
- [27] Serdarasan, S., & Tanyas, M. (2012). Dealing with complexity in the supply chain: The effect of supply chain management initiatives. Available at SSRN 2056331.
- [28] Garbie, I. H., & Shikdar, A. (2011). Analysis and estimation of complexity level in industrial firms. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 8(2), 175-197.
- [29] N. Orfi, J. Terpenney, & A. Sahin-Sariisik. "Harnessing product complexity: Step 1 - establishing product complexity dimensions and indicators". *EThe Engineering Economist*, pp. 59-79. 2011.
- [30] Ashby, W. (1963). *Ross: An Introduction to Cybernetics*. New York.
- [31] Simon, H. A. (1991). The architecture of complexity. In *Facets of systems science* (pp. 457-476). Springer, Boston, MA.
- [32] de Rosnay, J. (1977). *Il macroscopio: verso una visione globale* (Vol. 60). Edizioni Dedalo.
- [33] Yates, F. E. (1978). Complexity and the limits to knowledge. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 235(5), R201-R204.
- [34] Klir, G. J. (1985). Complexity: Some general observations. *Systems Research*, 2(2), 131-140.
- [35] Ulrich, H., & Probst, G. J. (1988). *Anleitung zum ganzheitlichen Denken. Ein Brevier für Führungskräfte*. Bern, Stuttgart: Haupt
- [36] Stacey, R. D., Griffin, D., & Shaw, P. (2000). *Complexity and management: Fad or radical challenge to systems thinking?*. Psychology Press.
- [37] Gare, A. (2000). *Systems Theory and Complexity: Introduction*.
- [38] Schuh, G. (2014). *Produktkomplexität managen: Strategien-Methoden-Tools*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG
- [39] Schuh, G. (2013). *Lean innovation*. Springer-Verlag.
- [40] Singh, G., Balaji, S., Shah, J. J., Corman, D., Howard, R., Mattikalli, R., & Stuart, D. (2012, August). Evaluation of network measures as complexity metrics. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 45011, pp. 1065-1076). American Society of Mechanical Engineers.
- [41] Tamaskar, S., Neema, K., & DeLaurentis, D. (2014). Framework for measuring complexity of aerospace systems. *Research in Engineering Design*, 25(2), 125-137.
- [42] Sinha, K., & de Weck, O. L. (2016). Empirical validation of structural complexity metric and complexity management for engineering systems. *Systems Engineering*, 19(3), 193-206.
- [43] Chryssolouris, G., Efthymiou, K., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Pagoropoulos, A. (2013). Flexibility and complexity: is it a trade-off?. *International Journal of Production Research*, 51(23-24), 6788-6802.
- [44] Byrne, D., & Callaghan, G. (2013). Complexity theory and the social sciences: The state of the

- art. Routledge.
- [45] Remus, W. (1987). A study of graphical and tabular displays and their interaction with environmental complexity. *Management Science*, 33(9), 1200-1204.
 - [46] Rivkin, J. W. (2000). Imitation of complex strategies. *Management science*, 46(6), 824-844.
 - [47] Pich, M. T., Loch, C. H., & Meyer, A. D. (2002). On uncertainty, ambiguity, and complexity in project management. *Management science*, 48(8), 1008-1023.
 - [48] Mihm, J., Loch, C., & Huchzermeier, A. (2003). Problem-solving oscillations in complex engineering projects. *Management Science*, 49(6), 733-750.
 - [49] Sommer, S. C., & Loch, C. H. (2004). Selectionism and learning in projects with complexity and unforeseeable uncertainty. *Management science*, 50(10), 1334-1347.
 - [50] Linn, S. C., & Tay, N. S. (2007). Complexity and the character of stock returns: Empirical evidence and a model of asset prices based on complex investor learning. *Management Science*, 53(7), 1165-1180.
 - [51] Rahmandad, H. (2008). Effect of delays on complexity of organizational learning. *Management Science*, 54(7), 1297-1312.
 - [52] Mihm, J., Loch, C. H., Wilkinson, D., & Huberman, B. A. (2010). Hierarchical structure and search in complex organizations. *Management science*, 56(5), 831-848.
 - [53] Kalkanci, B., Chen, K. Y., & Erhun, F. (2011). Contract complexity and performance under asymmetric demand information: An experimental evaluation. *Management science*, 57(4), 689-704.
 - [54] Briscoe, F., & Rogan, M. (2016). Coordinating complex work: Knowledge networks, partner departures, and client relationship performance in a law firm. *Management Science*, 62(8), 2392-2411.
 - [55] Gresov, C., Haveman, H. A., & Oliva, T. A. (1993). Organizational design, inertia and the dynamics of competitive response. *Organization Science*, 4(2), 181-208.
 - [56] Thietart, R. A., & Forgues, B. (1995). Chaos theory and organization. *Organization science*, 6(1), 19-31.
 - [57] Anderson, P. (1999). Perspective: Complexity theory and organization science. *Organization science*, 10(3), 216-232.
 - [58] Lewin, A. Y., & Volberda, H. W. (1999). Prolegomena on coevolution: A framework for research on strategy and new organizational forms. *Organization science*, 10(5), 519-534.
 - [59] Cohen, M. (1999). Commentary on the Organization Science special issue on complexity. *Organization science*, 10(3), 373-376.
 - [60] Anderson, P., Meyer, A., Eisenhardt, K., Carley, K., & Pettigrew, A. (1999). Introduction to the special issue: Applications of complexity theory to organization science. *Organization Science*, 10(3), 233-236.
 - [61] Morel, B., & Ramanujam, R. (1999). Through the looking glass of complexity: The dynamics of organizations as adaptive and evolving systems. *Organization Science*, 10(3), 278-293.
 - [62] McKelvey, B. (1999). Avoiding complexity catastrophe in coevolutionary pockets: Strategies for rugged landscapes. *Organization Science*, 10(3), 294-321.
 - [63] Dooley, K. J., & Van de Ven, A. H. (1999). Explaining complex organizational dynamics. *Organization Science*, 10(3), 358-372.
 - [64] Siggelkow, N., & Rivkin, J. W. (2005). Speed and search: Designing organizations for turbulence and complexity. *Organization Science*, 16(2), 101-122.
 - [65] Ethiraj, S. K., & Levinthal, D. (2009). Hoping for A to Z while rewarding only A: Complex organizations and multiple goals. *Organization Science*, 20(1), 4-21.
 - [66] Calinescu, A., Efstathiou, J., Schirn, J., & Bermejo, J. (1998). Applying and assessing two methods for measuring complexity in manufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, 49(7), 723-733.
 - [67] Efstathiou, J. (2002). The utility of complexity [manufacturing system evolution]. *Manufacturing*

- Engineer, 81(2), 73-76
- [68] Huaccho Huatuco, L., Efstathiou, J., Calinescu, A., Sivadasan, S., & Kariuki, S. (2009). Comparing the impact of different rescheduling strategies on the entropic-related complexity of manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 47(15), 4305-4325.
- [69] Efthymiou, K., Pagoropoulos, A., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2012). Manufacturing systems complexity review: challenges and outlook. *Procedia CIRP*, 3, 644-649.
- [70] ElMaraghy, W., ElMaraghy, H., Tomiyama, T., & Monostori, L. (2012). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP annals*, 61(2), 793-814.
- [71] Dost, H. U., Terno, J., & Scheithauer, G. (1989). On the stochastic complexity of the asymmetric traveling salesman problem. *European journal of operational research*, 43(3), 313-316.
- [72] Chen, C. L., & Bulfin, R. L. (1993). Complexity of single machine, multi-criteria scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 70(1), 115-125.
- [73] Cooper, W. W., Sinha, K. K., & Sullivan, R. S. (1995). Accounting for complexity in costing high technology manufacturing. *European Journal of Operational Research*, 85(2), 316-326.
- [74] Rayward-Smith, V. J. (1995). Introduction to the Theory of Complexity. *Journal of the Operational Research Society*, 46(12), 1507-1508.
- [75] De Reyck, B., & Herroelen, W. (1996). On the use of the complexity index as a measure of complexity in activity networks. *European Journal of Operational Research*, 91(2), 347-366.
- [76] Soukhal, A., Oulamara, A., & Martineau, P. (2005). Complexity of flow shop scheduling problems with transportation constraints. *European Journal of Operational Research*, 161(1), 32-41.
- [77] J. Yuan, A. Soukhal, Y. Chen, and L. Lu, "A note on the complexity of flow shop scheduling with transportation constraints". *European Journal of Operational Research*, vol. 178, no. 3, pp. 918-925. 2007. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.08.034
- [78] Briskorn, D., Choi, B. C., Lee, K., Leung, J., & Pinedo, M. (2010). Complexity of single machine scheduling subject to nonnegative inventory constraints. *European Journal of Operational Research*, 207(2), 605-619.
- [79] Gawiejnowicz, S., & Kononov, A. (2010). Complexity and approximability of scheduling resumable proportionally deteriorating jobs. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 305-308.
- [80] Brucker, P., Qu, R., & Burke, E. (2011). Personnel scheduling: Models and complexity. *European Journal of Operational Research*, 210(3), 467-473.
- [81] Espinosa, A., & Walker, J. (2013). Complexity management in practice: A Viable System Model intervention in an Irish eco-community. *European Journal of Operational Research*, 225(1), 118-129.
- [82] Pinker, E., Szmerekovsky, J., & Tilson, V. (2014). On the complexity of project scheduling to minimize exposed time. *European Journal of Operational Research*, 237(2), 448-453.
- [83] Archetti, C., Feillet, D., & Speranza, M. G. (2015). Complexity of routing problems with release dates. *European journal of operational research*, 247(3), 797-803.
- [84] Bruns, F., Knust, S., & Shakhlevich, N. V. (2016). Complexity results for storage loading problems with stacking constraints. *European Journal of Operational Research*, 249(3), 1074-1081
- [85] Kuschel, T., & Bock, S. (2016). The weighted uncapacitated planned maintenance problem: Complexity and polyhedral properties. *European journal of operational research*, 250(3), 773-781.
- [86] Wilding, R. (1998). The supply chain complexity triangle: uncertainty generation in the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
- [87] Novak, S., & Eppinger, S. D. (2001). Sourcing by design: Product complexity and the supply chain. *Management science*, 47(1), 189-204.
- [88] Milgate, M. (2001). Supply chain complexity and delivery performance: an international exploratory study. *Supply chain management: An international Journal*.
- [89] Vachon, S., & Klassen, R. D. (2002). An exploratory investigation of the effects of supply chain complexity on delivery performance. *IEEE Transactions on engineering management*, 49(3), 218-

230

- [90] Yang, B., & Yang, Y. (2010). Postponement in supply chain risk management: a complexity perspective. *International Journal of Production Research*, 48(7), 1901-1912.
- [91] Gimenez, C., Van Der Vaart, T., & Van Donk, D. P. (2012). Supply chain integration and performance: the moderating effect of supply complexity. *International Journal of Operations & Production Management*.
- [92] Blome, C., Schoenherr, T., & Eckstein, D. (2014). The impact of knowledge transfer and complexity on supply chain flexibility: A knowledge-based view. *International Journal of Production Economics*, 147, 307-316.
- [93] Quirk, M. (1999). *Manufacturing, Teams, and Improvement: The human art of manufacturing*. Prentice-Hall
- [94] Tanner, J. P. (1990). *Manufacturing Engineering: An Introduction to the Basic Functions, Revised and expanded (Vol. 36)*. CRC Press.
- [95] Wilson, B. (1984). *Systems: concepts, methodologies, and applications*. John Wiley & Sons, Inc.
- [96] Chryssolouris, G. (2006). Overview of manufacturing processes. *Manufacturing Systems: Theory and Practice*, 55-124
- [97] Isik, F. (2010). An entropy-based approach for measuring complexity in supply chains. *International journal of production research*, 48(12), 3681-3696.
- [98] Abad, R. C. (2002). *Introducción a la simulación ya la teoría de colas*. Netbiblo.
- [99] Frizelle, G., & Woodcock, E. (1995). Measuring complexity as an aid to developing operational strategy. *International Journal of Operations & Production Management*
- [100] Suh, N. P. (2005). *A theory of complexity and applications*. Massachusetts Institute of Technology Cambridge.
- [101] Papakostas, N., Efthymiou, K., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2009). Modelling the complexity of manufacturing systems using nonlinear dynamics approaches. *CIRP annals*, 58(1), 437-440.
- [102] Wildemann, H. (2000). *Komplexitätsmanagement: Vertrieb, Produkte, Beschaffung, F & E, Produktion und Administration*.
- [103] Meijer, B. R. (2002, April). Reducing complexity through organizational structuring in manufacturing and engineering. In *Proceedings of Manufacturing Complexity Network Conference* (pp. 9-10).
- [104] Seuring, S., Goldbach, M., & Koplin, J. (2004). Managing time and complexity in supply chains: two cases from the textile industry. *International Journal of Integrated Supply Management*, 1(2), 180-198.
- [105] Hoole, R. (2005). Five ways to simplify your supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*
- [106] Gabriel, A. (2007). The effect of internal static manufacturing complexity on manufacturing performance.
- [107] Haumann, M., Westermann, H. H., Seifert, S., & Butzer, S. (2012). Managing complexity--A methodology, exemplified by the industrial sector of remanufacturing.
- [108] Park, K., & Kremer, G. E. O. (2015). Assessment of static complexity in design and manufacturing of a product family and its impact on manufacturing performance. *International Journal of Production Economics*, 169, 215-232.
- [109] Arredondo, K., Ruíz, E., Martínez, R., & Leal, J. (2017). Análisis de la variabilidad del proceso de remanufactura asociado a la toma de decisiones. *Ecodiseño & Sostenibilidad*, vol. 1, pp. 107–126.
- [110] Modrak, V., & Soltysova, Z. (2017). Novel complexity indicator of manufacturing process chains and its relations to indirect complexity indicators. *Complexity*, 2017.
- [111] Karp, A., & Ronen, B. (1992). Improving shop floor control: an entropy model approach. *International Journal of Production Research*, 30(4), 923-938.

- [112]Sivadasan, S., Efstathiou, J., Frizelle, G., Shirazi, R., & Calinescu, A. (2002). An information-theoretic methodology for measuring the operational complexity of supplier-customer systems. *International Journal of Operations & Production Management*.
- [113]Makui, A., & Aryanezhad, M. B. (2003). A new method for measuring the static complexity in manufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, 54(5), 555-557.
- [114]Childerhouse, P., Aitken, J., & Towill, D. R. (2002). Analysis and design of focused demand chains. *Journal of Operations Management*, 20(6), 675-689.
- [115]Childerhouse, P., & Towill, D. R. (2003). Simplified material flow holds the key to supply chain integration. *Omega*, 31(1), 17-27.
- [116]Childerhouse, P., & Towill, D. R. (2004). Reducing uncertainty in European supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- [117]Blackhurst, J., Wu, T., & O'grady, P. (2004). Network-based approach to modelling uncertainty in a supply chain. *International journal of production research*, 42(8), 1639-1658.
- [118]Größler, A., Grübner, A., & Milling, P. M. (2006). Organisational adaptation processes to external complexity. *International Journal of Operations & Production Management*.
- [119]Wu, Y., Frizelle, G., & Efstathiou, J. (2007). A study on the cost of operational complexity in customer-supplier systems. *International Journal of Production Economics*, 106(1), 217-229.
- [120]Sivadasan, S., Smart, J., Huatuco, L. H., & Calinescu, A. (2010). Operational complexity and supplier-customer integration: case study insights and complexity rebound. *Journal of the Operational Research Society*, 61(12), 1709-1718.
- [121]Gray, J. V., Roth, A. V., & Leiblein, M. J. (2011). Quality risk in offshore manufacturing: Evidence from the pharmaceutical industry. *Journal of Operations Management*, 29(7-8), 737-752.
- [122]Isik, F. (2011). Complexity in supply chains: a new approach to quantitative measurement of the supply-chain-complexity. *Supply chain management*, 417-432.
- [123]Vrabic, R., & Butala, P. (2012). Assessing operational complexity of manufacturing systems based on statistical complexity. *International Journal of Production Research*, 50(14), 3673-3685.
- [124]Efthymiou, K., Pagoropoulos, A., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2014). Manufacturing systems complexity: An assessment of manufacturing performance indicators unpredictability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7(4), 324-334.
- [125]Hwang, H. B., & Yuan, X. (2014). Interpreting supply chain dynamics: A quasi-chaos perspective. *European Journal of Operational Research*, 233(3), 566-579.
- [126]Fischi, J., Nilchiani, R., & Wade, J. (2015). Dynamic complexity measures for use in complexity-based system design. *IEEE Systems Journal*, 11(4), 2018-2027
- [127]Huang, S., Wang, G., Shang, X., & Yan, Y. (2018). Reconfiguration point decision method based on dynamic complexity for reconfigurable manufacturing system (RMS). *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(5), 1031-1043.
- [128]Towill, D. R. (1999). Simplicity wins: twelve rules for designing effective supply chains. *Control*, March, 9-13.
- [129]Calinescu, A. (2000). Complexity in manufacturing: an information theoretic approach. In *Conference on complexity and complex systems in industry*, 19-20 Sept 2000 (pp. 19-20). University of Warwick.
- [130]Efstathiou, J., Calinescu, A., & Blackburn, G. (2002). A web-based expert system to assess the complexity of manufacturing organizations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 18(3-4), 305-311.
- [131]Sivadasan, S., Efstathiou, J., Calinescu, A., & Huatuco, L. H. (2004). Supply chain complexity In S. New & R. Westbrook (Eds.), *Understanding supply chains*.
- [132]Blecker, T., Kersten, W., & Meyer, C. M. (2005). Development of an approach for analyzing supply chain complexity. In *Mass Customization: Concepts-Tools-Realization*. Proceedings of the International Mass Customization Meeting (pp. 47-59).

- [133]Hu, S. J., Zhu, X., Wang, H., & Koren, Y. (2008). Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. *CIRP annals*, 57(1), 45-48.
- [134]Donner, R., Scholz-Reiter, B., & Hinrichs, U. (2008). Nonlinear characterization of the performance of production and logistics networks. *Journal of Manufacturing Systems*, 27(2), 84-99.
- [135]Windt, K., Philipp, T., & Böse, F. (2008). Complexity cube for the characterization of complex production systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(2), 195-200
- [136]Gullander, P., Davidsson, A., Dencker, K., Fasth, Å., Fässberg, T., Harlin, U., & Stahre, J. (2011). Towards a production complexity model that supports operation, re-balancing and man-hour planning. In *Proceedings of the 4th Swedish Production Symposium (SPS)*: Lund, Sweden.
- [137]Zhang, Z. (2011). Modeling complexity of cellular manufacturing systems. *Applied Mathematical Modelling*, 35(9), 4189-4195.
- [138]Smart, J., Calinescu, A., & Huatuco, L. H. (2013). Extending the information-theoretic measures of the dynamic complexity of manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 51(2), 362-379.
- [139]Serdarasan, S. (2013). A review of supply chain complexity drivers. *Computers & Industrial Engineering*, 66(3), 533-540.
- [140]Calinescu, A., Efstathiou, J., Bermejo, J., & Schirn, J. (1997). Modelling and simulation of a real complex process-based manufacturing system. In *Proceedings of the Thirty-Second International Matador Conference* (pp. 137-142). Palgrave, London.
- [141]Datar, S. M., Kekre, S., Mukhopadhyay, T., & Srinivasan, K. (1993). Simultaneous estimation of cost drivers. *Accounting Review*, 602-614.
- [142]G: Frizelle. (1996). Getting the measure of complexity. *Manufacturing Engineer*, vol. 75, no. 6, pp. 268-270.
- [143]Surana, A., Kumara, S., Greaves, M., & Raghavan, U. N. (2005). Supply-chain networks: a complex adaptive systems perspective. *International Journal of Production Research*, 43(20), 4235-4265.
- [144]Rose-Anderssen, C., Baldwin, J., & Ridgway, K. (2017). Manufacturing systematics and cladistics: state of the art and generic classification. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- [145]Arredondo Soto, K. C., Carrillo Gutiérrez, T., Salazar Ruiz, E., & Solís Quinteros, M. (2014). Factores relevantes de la complejidad en el proceso de remanufactura: caso de la industria metalmeccánica. *Epistemos. Ciencia, tecnología y salud*, (16), 88-94.
- [146]Wiendahl, H. P., & Scholtissek, P. (1994). Management and control of complexity in manufacturing. *CIRP annals*, 43(2), 533-540.
- [147]Wagensberg, J. (2007). *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Barcelona, Tusquets.
- [148]Salum, L. (2000). The cellular manufacturing layout problem. *International Journal of Production Research*, 38(5), 1053-1069.
- [149]Heragu, S. S., & Kusiak, A. (1988). Machine layout problem in flexible manufacturing systems. *Operations research*, 36(2), 258-268.
- [150]Meller, R. D., & Gau, K. Y. (1996). The facility layout problem: recent and emerging trends and perspectives. *Journal of manufacturing systems*, 15(5), 351-366.
- [151]Li, S., Rao, S. S., Ragu-Nathan, T. S., & Ragu-Nathan, B. (2005). Development and validation of a measurement instrument for studying supply chain management practices. *Journal of operations management*, 23(6), 618-641.
- [152]Simon, H. A. (2002). The architecture of complexity. *Managing in the Modular Age: Architectures, Networks, and Organizations*, 15-38.
- [153]Wiendahl, H. P., & Worbs, J. (2003). Simulation based analysis of complex production systems with methods of non-linear dynamics. *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1-3), 28-

34.

- [154] Meyers, R. A. (Ed.). (2009). *Encyclopedia of complexity and systems science* (Vol. 9). New York: Springer.
- [155] Wu, Y. R., Huatuco, L. H., Frizelle, G., & Smart, J. (2013). A method for analysing operational complexity in supply chains. *Journal of the Operational Research Society*, 64(5), 654-667.
- [156] Zuzana, S., Slavomir, B., & Annamaria, B. (2019). Measuring Production Process Complexity. In *Smart Technology Trends in Industrial and Business Management* (pp. 71-83). Springer, Cham.
- [157] Brinzer, B., & Banerjee, A. (2017). Measuring the human aspect: the key for managing the complexity in production. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (pp. 14-24). Springer, Cham.
- [158] Jung, S., Sinha, K., & Suh, E. S. (2020). Domain Mapping Matrix-Based Metric for Measuring System Design Complexity. *IEEE Transactions on Engineering Management*.
- [159] Gomes, V. M., Paiva, J. R., Reis, M. R., Wainer, G. A., & Calixto, W. P. (2019). Mechanism for Measuring System Complexity Applying Sensitivity Analysis. *Complexity*, 2019.
- [160] Modrak, V., & Soltysova, Z. (2018). Development of operational complexity measure for selection of optimal layout design alternative. *International Journal of Production Research*, 56(24), 7280-7295.
- [161] Vanmali, A. V., Deshmukh, S. S., & Gadre, V. M. (2013). Low complexity detail preserving multi-exposure image fusion for images with balanced exposure. In *2013 National Conference on Communications (NCC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [162] Andersson, C., & Bellgran, M. (2015). On the complexity of using performance measures: Enhancing sustained production improvement capability by combining OEE and productivity. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 144-154.
- [163] Fera, M., Macchiaroli, R., Fruggiero, F., & Lambiase, A. (2018). A new perspective for production process analysis using additive manufacturing—complexity vs production volume. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1), 673-685
- [164] Broniatowski, D. A., & Moses, J. (2016). Measuring flexibility, descriptive complexity, and rework potential in generic system architectures. *Systems Engineering*, 19(3), 207-221.
- [165] Turco, A. L., & Maggioni, D. (2020). The knowledge and skill content of production complexity. *Research Policy*, 104059.
- [166] Brinzer, B., & Schneider, K. (2020). Complexity assessment in production: linking complexity drivers and effects. *Procedia CIRP*, 93, 694-699.
- [167] Juffs, A., & Han, N. R. (2019). Combining Formal and Usage-Based Theories with Data Science Techniques in Measuring the Development of Syntactic Complexity in Written Production. In *2019 conference of the American Association for Applied Linguistics (AAAL)*. AAAL.
- [168] Kavilal, E. G., Venkatesan, S. P., & Sanket, J. (2018). An integrated interpretive structural modeling and a graph-theoretic approach for measuring the supply chain complexity in the Indian automotive industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- [169] Hamta, N., Shirazi, M. A., Behdad, S., & Ghomi, S. F. (2018). Modeling and measuring the structural complexity in assembly supply chain networks. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(2), 259-275.
- [170] Guoliang, F., Aiping, L., Giovanni, M., Liyun, X., & Xuemei, L. (2017). Operation-based configuration complexity measurement for manufacturing system. *Procedia CIRP*, 63, 645-650.
- [171] Raihanian Mashhadi, A., & Behdad, S. (2017). Measuring the Complexity of Additive Manufacturing Supply Chains. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference* (Vol. 50732, p. V002T01A037). American Society of Mechanical Engineers.
- [172] Fan, G., Li, A., Xie, N., Xu, L., & Liu, X. (2017). Production Line Layout Planning Based on Complexity Measurement. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 11(10), 1626-1629.
- [173] He, X. J., Wei, G. D., & Wu, Y. Y. (2017). Complexity Measurement of Automobile Manufacturing Industry Network Environment Based on Fuzzy Evidential Reasoning. *Operations Research and Management Science*, 02.

- [174]Schlick, C., & Demissie, B. (2016). Validity Analysis of Selected Closed-Form Solutions for Effective Measure Complexity. In *Product Development Projects* (pp. 283-351). Springer, Cham.
- [175]Jonsson, P., & Ivert, L. K. (2015). Improving performance with sophisticated master production scheduling. *International Journal of Production Economics*, 168, 118-130.
- [176]Drzymalski, J. (2015). A measure of supply chain complexity incorporating virtual arcs. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 24(4), 486-499.
- [177]Townsend, V., & Urbanic, J. (2015). A case study measuring the impact of a participatory design intervention on system complexity and cycle time in an assemble-to-order system. *Procedia Manufacturing*, 1, 134-145.
- [178]Youn, S. J. (2014). Measuring syntactic complexity in L2 pragmatic production: Investigating relationships among pragmatics, grammar, and proficiency. *System*, 42, 270-287.
- [179]Schoettl, F., Paefgen, M. C., & Lindemann, U. (2014). Approach for Measuring Change-Induced Complexity Based on the Production Architecture. *Procedia CIRP*, 17, 172-177.
- [180]Modrak, V., & Marton, D. (2014). Approaches to Defining and Measuring Assembly Supply Chain Complexity. In *Discontinuity and Complexity in Nonlinear Physical Systems* (pp. 193-213). Springer, Cham.
- [181]Malone, P., & Wolfarth, L. (2013). Measuring system complexity to support development cost estimates. In *2013 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1-13). IEEE.
- [182]Grussenmeyer, R., & Blecker, T. (2013). Complexity and Robustness Influence on Production Performance—A Theoretical Framework. In *Kompetenz, Interdisziplinarität und Komplexität in der Betriebswirtschaftslehre* (pp. 57-69). Springer Gabler, Wiesbaden.
- [183]Zhang, Z. (2012). Manufacturing complexity and its measurement based on entropy models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9), 867-873.
- [184]Mattsson, S., Gullander, P., Harlin, U., Bäckstrand, G., Fasth, Å., & Davidsson, A. (2012). Testing complexity index—a method for measuring perceived production complexity. *Procedia CIRP*, 3, 394-399.
- [185]Gravier, M. J., & Kelly, B. P. (2012). Measuring the cost of complexity in supply chains: Comparison of weighted entropy and the bullwhip effect index. In *Modelling Value* (pp. 257-271). Physica-Verlag HD.
- [186]Ma, X. B., Li, G. F., Liu, L. L., & Liu, Y. H. (2012). Measurement of manufacturing system complexity based on key resources. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 201, pp. 1037-1041). Trans Tech Publications Ltd.
- [187]Mattsson, S., Gullander, P., & Davidsson, A. (2011). Method for measuring production complexity. In *28th International Manufacturing Conference*.
- [188]Kellert, S. H. (1994). *In the wake of chaos: Unpredictable order in dynamical systems*. University of Chicago press.
- [189]Peters, K., Worbs, J., Parlitz, U., & Wiendahl, H. P. (2004). Manufacturing systems with restricted buffer sizes. *Nonlinear dynamics of production systems*, 39-54.
- [190]Chryssolouris, G., Giannelos, N., Papakostas, N., & Mourtzis, D. (2004). Chaos theory in production scheduling. *CIRP Annals*, 53(1), 381-383.
- [191]Giannelos, N., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2007). Dispatching policy for manufacturing jobs and time-delay plots. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20(4), 329-337.
- [192]Wolf, A. (2014). 13. Quantifying chaos with Lyapunov exponents. In *Chaos* (pp. 273-290). Princeton University Press.
- [193]Papakostas, N., & Mourtzis, D. (2007). An approach for adaptability modeling in manufacturing—analysis using chaotic dynamics. *CIRP annals*, 56(1), 491-494.
- [194]Wang, K. J., Wee, H. M., Gao, S. F., & Chung, S. L. (2005). Production and inventory control with chaotic demands. *Omega*, 33(2), 97-106.
- [195]Scholz-Reiter, B., Freitag, M., & Schmieder, A. (2002). Modelling and control of production systems based on nonlinear dynamics theory. *Cirp Annals*, 51(1), 375-378.
- [196]Pan, Y., & Chen, J. (2016). The changes of complexity in the performance degradation process of rolling element bearing. *Journal of Vibration and Control*, 22(2), 344-357.
- [197]Ndofor, H. A., Fabian, F., & Michel, J. G. (2018). Chaos in industry environments. *IEEE*

- Transactions on Engineering Management, 65(2), 191-203.
- [198]Guo, Q. (2018). Early Fault Identification Of Rolling Bearing Based On Chaos Characteristic Parameters. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 16(4).
- [199]Ma, J., Lou, W., & Tian, Y. (2019). Bullwhip effect and complexity analysis in a multi-channel supply chain considering price game with discount sensitivity. *International Journal of Production Research*, 57(17), 5432-5452.
- [200]Yu, J., Cao, J., Wang, W., & Liao, W. (2017). Recurrence Plot and Recurrence Quantification Analysis of Human Gait Complexity. *Journal of Xi'An Jiaotong university*, 51(10), 47-52.
- [201]Donner, R. V., Donges, J. F., Zou, Y., & Feldhoff, J. H. (2015). Complex network analysis of recurrences. In *Recurrence Quantification Analysis* (pp. 101-163). Springer, Cham.
- [202]Leverick, G., Wu, C., & Szturm, T. (2015). Coarse quantization in calculations of entropy measures for experimental time series. *Nonlinear Dynamics*, 79(1), 93-100.
- [203]Elias, J., & Namboothiri, V. N. (2014). Cross-recurrence plot quantification analysis of input and output signals for the detection of chatter in turning. *Nonlinear Dynamics*, 76(1), 255-261.
- [204]Sun, Y., & Wu, C. Q. (2012). A radial-basis-function network-based method of estimating Lyapunov exponents from a scalar time series for analyzing nonlinear systems stability. *Nonlinear Dynamics*, 70(2), 1689-1708
- [205]Yan, R., Liu, Y., & Gao, R. X. (2012). Permutation entropy: a nonlinear statistical measure for status characterization of rotary machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 29, 474-484.
- [206]Benaissa, K., Diep, D., & Dolgui, A. (2008). Control of chaos in agent based manufacturing systems. In *2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation* (pp. 1252-1259). IEEE.
- [207]Makui, A., & Madadi, A. (2007). Operational(dynamic) complexity and its behavior insupply chain. *WSEAS Transactions on Systems*, 6(1), 162-166.
- [208]Kwuimy, C. K., Samadani, M., & Nataraj, C. (2014). Bifurcation analysis of a nonlinear pendulum using recurrence and statistical methods: applications to fault diagnostics. *Nonlinear Dynamics*, 76(4), 1963-1975.
- [209]Wang, J., Hu, Z., & Wang, X. (2010). Complex dynamic behaviors of supply chain system with constraint of production capacity. In *2010 7th International Conference on Service Systems and Service Management* (pp. 1-5). IEEE.
- [210]Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3), 379-423.
- [211]Modrak, V., & Semanco, P. (2012). Structural complexity assessment: A design and management tool for supply chain optimization. *Procedia CIRP*, 3, 227-232.
- [212]Wu, S., Fu, Y., Shen, H., & Liu, F. (2018). Using ranked weights and Shannon entropy to modify regional sustainable society index. *Sustainable cities and society*, 41, 443-448.
- [213]Garbie, I. H. (2012). Concepts and measurements of industrial complexity: a state-of-the-art survey. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 12(1), 42-83.
- [214]Mourtzis, D., Doukas, M., & Psarommatis, F. (2013). Design and operation of manufacturing networks for mass customisation. *CIRP Annals*, 62(1), 467-470.
- [215]Mourtzis, D., Doukas, M., & Psarommatis, F. (2015). A toolbox for the design, planning and operation of manufacturing networks in a mass customisation environment. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 274-286.
- [216]Zhang, Z., Zhang, Z., Ma, W., & Zhou, H. (2017). Research on Shortest Paths-Based Entropy of Weighted Complex Networks. In *International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation* (pp. 793-800). Springer, Singapore.
- [217]Manns, M., Otto, M., & Mauer, M. (2016). Measuring motion capture data quality for data driven human motion synthesis. *Procedia CIRP*, 41, 945-950.
- [218]Sharma, A., Amarnath, M., & Kankar, P. K. (2016). Feature extraction and fault severity classification in ball bearings. *Journal of Vibration and Control*, 22(1), 176-192.
- [219]Modrak, V., Marton, D., & Bednar, S. (2014). Modeling and determining product variety for mass-customized manufacturing. *Procedia CIRP*, 23(0), 258-63.
- [220]Modrak, V., & Marton, D. (2013). Complexity metrics for assembly supply chains: A comparative

- study. In *Advanced Materials Research* (Vol. 629, pp. 757-762). Trans Tech Publications Ltd.
- [221]Modrak, V., & Marton, D. (2012). Modelling and complexity assessment of assembly supply chain systems. *Procedia Engineering*, 48, 428-435.
- [222]Bone, M. A., Cloutier, R., Korfiatis, P., & Carrigy, A. (2010). System architecture: Complexities role in architecture entropy. In *2010 5th International Conference on System of Systems Engineering* (pp. 1-6). IEEE.
- [223]Kamrani, A. K., & Adat, A. (2008). Manufacturing complexity analysis: a simulation-based methodology. In *Collaborative Engineering* (pp. 227-248). Springer, Boston, MA.
- [224]Park, J. B., Lee, J. W., Jo, H. H., Yang, J. S., & Moon, H. T. (2006). Complexity and entropy density analysis of the Korean stock market. In *9th Joint Conference on Information Sciences, JCIS 2006* (Vol. 2006). JCIS.
- [225]ElMaraghy, H. A., Abdallah, I. B., & ElMaraghy, W. H. (1998). On-line simulation and control in manufacturing systems. *CIRP Annals*, 47(1), 401-404.
- [226]Fan, G., Li, A., Zhao, Y., Moroni, G., & Xu, L. (2018). Human factors' complexity measurement of human-based station of assembly line. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 28(6), 342-351.
- [227]Mizgier, K. J. (2017). Global sensitivity analysis and aggregation of risk in multi-product supply chain networks. *International Journal of Production Research*, 55(1), 130-144.
- [228]Jiang, K., Xu, G., Tao, T., & Liang, L. (2015). Rolling bearing quality evaluation based on a morphological filter and a Kolmogorov complexity measure. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(3), 459-464.
- [229]Kandjani, H., Tavana, M., Bernus, P., Wen, L., & Mohtarami, A. (2015). Using extended Axiomatic Design theory to reduce complexities in Global Software Development projects. *Computers in Industry*, 67, 86-96.
- [230]Cui, P. L., Wang, H. F., Chen, J. Y., & Xu, T. H. (2015). Information entropy-based method for complexity measurement of train control system. *Journal of the China Railway Society*, 37(9).
- [231]Li, Z., Baseman, R. J., Zhu, Y., Tipu, F. A., Slonim, N., & Shpigelman, L. (2013). A unified framework for outlier detection in trace data analysis. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 27(1), 95-103.
- [232]Yusuf, Y. Y., Gunasekaran, A., Musa, A., El-Berishy, N. M., Abubakar, T., & Ambursa, H. M. (2013). The UK oil and gas supply chains: An empirical analysis of adoption of sustainable measures and performance outcomes. *International Journal of Production Economics*, 146(2), 501-514.
- [233]De Biagi, V., & Chiaia, B. (2013). Complexity and robustness of frame structures. *International Journal of Solids and Structures*, 50(22-23), 3723-3741.
- [234]Allaire, D., He, Q., Deyst, J., & Willcox, K. (2012). An information-theoretic metric of system complexity with application to engineering system design. *Journal of Mechanical Design*, 134(10).
- [235]ElMaraghy, W., ElMaraghy, H., Tomiyama, T., & Monostori, L. (2012). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP annals*, 61(2), 793-814.
- [236]Khan, W. A., & Angeles, J. (2011). A novel paradigm for the qualitative synthesis of simple kinematic chains based on complexity measures. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 3(3).
- [237]Frizelle, G., & Suhov, Y. (2008). The measurement of complexity in production and other commercial systems. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 464(2098), 2649-2668.
- [238]Li, X., & Chandra, C. (2007). A knowledge integration framework for complex network management. *Industrial Management & Data Systems*.
- [239]Frizelle, G., & Suhov, Y. M. (2001). An entropic measurement of queueing behaviour in a class of manufacturing operations. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 457(2011), 1579-1601.
- [240]Zeltzer, L., Limère, V., Van Landeghem, H., Aghezzaf, E. H., & Stahre, J. (2013). Measuring complexity in mixed-model assembly workstations. *International Journal of Production Research*, 51(15), 4630-4643.
- [241]Mattsson, S., Gullander, P., & Davidsson, A. (2011). Method for measuring production complexity. In *28th International Manufacturing Conference*.

- [242]Schützer, K., Moura, A. Á. D. A., Anderl, R., & Mosch, C. (2012). A web service application to support distributed manufacturing. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34(2), 120-125.
- [243]Kim, Y. S. (1999). A system complexity approach for the integration of product development and production system design (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [244]ElMaraghy, W. H., & Urbanic, R. J. (2003). Modelling of manufacturing systems complexity. *CIRP Annals*, 52(1), 363-366.
- [245]ElMaraghy, H. A., Kuzgunkaya, O., & Urbanic, R. J. (2005). Manufacturing systems configuration complexity. *CIRP annals*, 54(1), 445-450.
- [246]Németh, P., & Földesi, P. (2009). Efficient control of logistic processes using multi-criteria performance measurement. *Acta Technica Jaurinensis*, 2(3), 353-360.
- [247]ElMaraghy, H., AlGeddawy, T., Samy, S. N., & Espinoza, V. (2014). A model for assessing the layout structural complexity of manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), 51-64.
- [248]Anderson, E. J. (1981). A new continuous model for job-shop scheduling. *International journal of systems science*, 12(12), 1469-1475.
- [249]Avram, F., Bertsimas, D., & Ricard, M. (1995). Fluid models of sequencing problems in open queueing networks; an optimal control approach. In *IMA* (Vol. 71, p. 199).
- [250]Dai, J. G. (1995). On positive Harris recurrence of multiclass queueing networks: a unified approach via fluid limit models. *The Annals of Applied Probability*, 49-77.
- [251]Weiss, G. (1999, September). Scheduling and control of manufacturing systems-a fluid approach. In *Proceedings Of The Annual Allerton Conference On Communication Control And Computing* (Vol. 37, pp. 577-586). The University; 1998.
- [252]Guimaraes, T., Martensson, N., Stahre, J., & Igbaria, M. (1999). Empirically testing the impact of manufacturing system complexity on performance. *International Journal of Operations & Production Management*.
- [253]Eckstein, D., Goellner, M., Blome, C., & Henke, M. (2015). The performance impact of supply chain agility and supply chain adaptability: the moderating effect of product complexity. *International Journal of Production Research*, 53(10), 3028-3046.
- [254]Van Landeghem, H., & Aghezzaf, E. H. (2016). Complexity issues in mass customized manufacturing. In *Mass customized manufacturing: theoretical concepts and practical approaches* (pp. 58-90).
- [255]Tarrar, M., Harari, N. S., & Mattsson, S. (2016). Using the CompleXity Index to discuss improvements at work: A case study in an automotive company. In *7th Swedish Production Symposium*.
- [256]Mattsson, S., Karlsson, M., Gullander, P., Van Landeghem, H., Zeltzer, L., Limère, V., & Stahre, J. (2014). Comparing quantifiable methods to measure complexity in assembly. *International Journal of Manufacturing Research*, 9(1), 112-130.
- [257]Falck, A. C., Tarrar, M., Mattsson, S., Andersson, L., Rosenqvist, M., & Söderberg, R. (2017). Assessment of manual assembly complexity: a theoretical and empirical comparison of two methods. *International Journal of Production Research*, 55(24), 7237-7250.
- [258]Mattsson, S., Tarrar, M., & Fast-Berglund, Å. (2016). Perceived production complexity—understanding more than parts of a system. *International Journal of Production Research*, 54(20), 6008-6016.
- [259]Urbanic, R. J., & ElMaraghy, W. H. (2006). Modeling of manufacturing process complexity. In *Advances in Design* (pp. 425-436). Springer, London.
- [260]Romano, P. (2009). How can fluid dynamics help supply chain management?. *International Journal of Production Economics*, 118(2), 463-472.
- [261]Battini, D., Persona, A., & Allesina, S. (2007). Towards a use of network analysis: quantifying the complexity of Supply Chain Networks. *International Journal of Electronic Customer Relationship Management*, 1(1), 75-90.
- [262]Mourtzis, D., & Doukas, M. (2014). Design and planning of manufacturing networks for mass customisation and personalisation: challenges and outlook. *Procedia Cirp*, 19, 1-13.
- [263]Efthymiou, K., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2009). Fluid dynamics analogy

- to manufacturing systems. In 42nd CIRP conference on manufacturing systems, Grenoble, France.
- [264] Abdullah, N. L., Jamaludin, K. R., & Talib, H. H. A. (2014). Pretesting Impact of Operational Complexity in Malaysia's Electrical and Electronics Manufacturing Industry. *Jurnal Teknologi*, 67(3).
- [265] Dekkers, R., Kühnle, H., Gerschberger, M., Engelhardt-Nowitzki, C., Kummer, S., & Staberhofer, F. (2012). A model to determine complexity in supply networks. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- [266] Watkins, T. A., & Kelley, M. R. (2001). Manufacturing scale, lot sizes and product complexity in defense and commercial manufacturing. *Defence and Peace Economics*, 12(3), 229-247.
- [267] Schoenherr, T., Hilpert, D., Soni, A. K., Venkataramanan, M. A., & Mabert, V. A. (2010). Enterprise systems complexity and its antecedents: a grounded-theory approach. *International Journal of Operations & Production Management*.
- [268] Schuh, G., & Eversheim, W. (2004). Release-Engineering—An Approach to Control Rising System-Complexity. *CIRP Annals*, 53(1), 167-170.
- [269] Lin, G. Y., Breitwieser, R., Cheng, F., Eagen, J. T., & Ettl, M. (2001). Product hardware complexity and its impact on inventory and customer on-time delivery. In *Information-Based Manufacturing* (pp. 61-79). Springer, Boston, MA.
- [270] Clark, J. B., & Jacques, D. R. (2012). Practical measurement of complexity in dynamic systems. *Procedia Computer Science*, 8, 14-21
- [271] Van Donk, D. P., & Van Dam, P. (1996). Structuring complexity in scheduling: a study in a food processing industry. *International Journal of Operations & Production Management*.
- [272] Giachetti, R. E., Martinez, L. D., Sáenz, O. A., & Chen, C. S. (2003). Analysis of the structural measures of flexibility and agility using a measurement theoretical framework. *International journal of production economics*, 86(1), 47-62.
- [273] Cho, S., Alamoudi, R., & Asfour, S. (2009). Interaction-based complexity measure of manufacturing systems using information entropy. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22(10), 909-922.
- [274] Arteta, B. M., & Giachetti, R. E. (2004). A measure of agility as the complexity of the enterprise system. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 20(6), 495-503.
- [275] Guide Jr, V. D. R., Srivastava, R., & Kraus, M. E. (1997). Product structure complexity and scheduling of operations in recoverable manufacturing. *International Journal of Production Research*, 35(11), 3179-3200.
- [276] Fan, G., Li, A., Liu, X., & Xu, L. (2017). Performance complexity measurement of tightening equipment based on Kolmogorov entropy. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 11(3), 647-652.
- [277] Lee, H. F., Srinivasan, M. M., & Yano, C. A. (2006). A framework for capacity planning and machine configuration in flexible assembly systems. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 18(4), 239-268.
- [278] Seifert, S., Butzer, S., Westermann, H. H., & Steinhilper, R. (2013). Managing complexity in Remanufacturing. In *Proc World Congress on Engineering*, UK.
- [279] Mattsson, S., Fasth, Å., Stahre, J., Karlsson, M., Dencker, K., Gullander, P., & Davidsson, A. (2013). Validation of the complexity index method at three manufacturing companies. In *2013 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)* (pp. 55-57). IEEE.
- [280] Banker, R. D., Datar, S. M., Kekre, S., & Mukhopadhyay, T. (1989). Costs of product and process complexity (No. 88-89-67). Carnegie Mellon University, Tepper School of Business.
- [281] Bick, W., & Drexel-Wittbecker, S. (2008). *Komplexität reduzieren: Konzept. Methoden. Praxis. LOG_X*, Stuttgart
- [282] Aelker, J., Bauernhansl, T., & Ehm, H. (2013). Managing complexity in supply chains: A discussion of current approaches on the example of the semiconductor industry. *Procedia CIRP*, 7, 79-84.
- [283] Michalos, G., Makris, S., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2010). Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(2), 81-91.
- [284] Simoes, A. J. G., & Hidalgo, C. A. (2011, August). The economic complexity observatory: An

- analytical tool for understanding the dynamics of economic development. In Workshops at the twenty-fifth AAAI conference on artificial intelligence.
- [285] Fernández Collado, C., Baptista Lucio, P., & Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. Editorial McGraw Hill.
- [286] Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigación científica*. Editorial Limusa.
- [287] Garbie, I. H., & Shikdar, A. (2010). Complexity level in industrial firms: case studies and implementation. In *Proceedings of the 2010 international conference on industrial engineering and operations management (IEOM 2010)* (pp. 9-10). Dhaka, Bangladesh: International University of Bangladesh.
- [288] Kohr, D., Budde, L., & Friedli, T. (2017). Identifying complexity drivers in discrete manufacturing and process industry. *Procedia CIRP*, 63, 52-57.
- [289] Alshammari, F., Yahya, K., & Haron, Z. (2020). A conceptual approach in developing a project manager's skills framework (PMSF) for improving the performance of complex projects in Kuwait construction industry. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 849, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.
- [290] Almasarwah, N., & Süer, G. (2019). Flexible flowshop design in cellular manufacturing systems. *Procedia Manufacturing*, 39, 991-1001.
- [291] Kurz, M. E., & Askin, R. G. (2003). Comparing scheduling rules for flexible flow lines. *International Journal of Production Economics*, 85(3), 371-388.
- [292] Quadt, D., & Kuhn, H. (2007). A taxonomy of flexible flow line scheduling procedures. *European journal of operational research*, 178(3), 686-698.
- [293] Bouras, A., Masmoudi, M., Saadani, N. E. H., & Bahroun, Z. (2017). A three-stage appointment scheduling for an outpatient chemotherapy unit using integer programming. In *2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)* (pp. 0916-0921). IEEE.
- [294] Guinet, A.G.P., Solomon, M., (1996). Scheduling hybrid flowshops to minimize maximum tardiness or maximum completion time. *International Journal of Production Research* 34 (6), 1643–1654.
- [295] Ho, M. H., Hnaien, F., & Dugardin, F. (2021). Electricity cost minimisation for optimal makespan solution in flow shop scheduling under time-of-use tariffs. *International journal of production research*, 59(4), 1041-1067.
- [296] Yan, J., Li, L., Zhao, F., Zhang, F., & Zhao, Q. (2016). A multi-level optimization approach for energy-efficient flexible flow shop scheduling. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1543-1552.
- [297] Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M. A., & Li, W. D. (2013). Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(5), 418-429.
- [298] Marichelvam, M. K., Geetha, M., & Tosun, Ö. (2020). An improved particle swarm optimization algorithm to solve hybrid flowshop scheduling problems with the effect of human factors—A case study. *Computers & Operations Research*, 114, 104812.
- [299] Agnetis, A., Pacifici, A., Rossi, F., Lucertini, M., Nicoletti, S., Nicolo, F., Oriolo, G., Pacciarelli, D., Pesaro, E., (1997). Scheduling of flexible flow lines in an automobile assembly plant. *European Journal of Operational Research* 97, 348–362.
- [300] Tsubone, H., Ohba, M., Takamuki, H., & Miyake, Y. (1993). A production scheduling system for a hybrid flow shop—a case study. *Omega*, 21(2), 205-214.
- [301] Alisantoso, D., Khoo, L. P., & Jiang, P. Y. (2003). An immune algorithm approach to the scheduling of a flexible PCB flow shop. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(11), 819-827.
- [302] Piramuthu, S., Raman, N., Shaw, M.J., (1994). Learning-based scheduling in a flexible manufacturing flow line. *IEEE Transactions on Engineering Management* 41 (2), 172–182.
- [303] Wang, S., Wang, X., Chu, F., & Yu, J. (2020). An energy-efficient two-stage hybrid flow shop scheduling problem in a glass production. *International Journal of Production Research*, 58(8), 2283-2314.
- [304] Liu, M., Yang, X., Zhang, J., & Chu, C. (2017). Scheduling a tempered glass manufacturing system: a three-stage hybrid flow shop model. *International Journal of Production Research*,

- 55(20), 6084-6107.
- [305]Leon, V.J., Ramamoorthy, B., (1997). An adaptable problemspace- based search method for flexible flow line scheduling. *IIE Transactions* 29, 115–125.
- [306]Rahmani, D., & Ramezani, R. (2016). A stable reactive approach in dynamic flexible flow shop scheduling with unexpected disruptions: A case study. *Computers & Industrial Engineering*, 98, 360-372.
- [307]Riane, F., (1998). *Scheduling Hybrid Flowshops: Algorithms and Applications*. Ph.D. Thesis, Faculte’s Universitaires Catholiques de Mons.
- [308]Salvador, M.S., (1973). A solution to a special class of flow shop scheduling problems. In: Elmaghraby, S.E. (Ed.), *Symposium on the Theory of Scheduling and Its Applications*. Springer, Berlin, pp. 83–91
- [309]Quadt, D., Kuhn, H., (2005). A conceptual framework for lotsizing and scheduling of flexible flow lines. *International Journal of Production Research* 43 (11), 2291–2308.
- [310]Wittrock, R.J., (1988). An adaptable scheduling algorithm for flexible flow lines. *Operations Research* 36 (4), 445–453.
- [311]Frizelle, G. (1998). The management of complexity in manufacturing: a strategic route map to competitive advantage through the control and measurement of complexity. *Business Intelligence*.
- [312]Naylor, B. & Kong, Ch. (1971). *Técnicas de Simulación en Computadoras*, Editorial Limusa.
- [313]Montoya, J. (2007). *Notas Técnicas Simulación Conceptos Básicos sobre Simulación de Eventos Discretos*. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia.
- [314]ProModel Corporation. (1999). *ProModel, Software de Simulación de Manufactura. Manual del Usuario*, Estados Unidos de América.
- [315]Gordon, G. (1978). *Simulación de Sistemas*. Editora Diana. México.
- [316] Valero, F. A., Esteban, F. C. L., García, A. B., & Perales, D. P. (2007). Propuesta de marco conceptual para el modelado del proceso de planificación colaborativa de operaciones en contextos de Redes de Suministro/Distribución (RdS/D). In *XI Congreso de Ingeniería de Organización* (pp. 0873-0882).
- [317]Esteban, F. C. L., & Perales, D. P. (2005). Gestión de Redes de Suministro (GRdS): sus Tipologías y Clasificaciones. Modelos de Referencia Conceptuales y Analíticos*. In *IX Congreso de Ingeniería de Organización* (p. 163).
- [318]Alemany, M. D. M. E., Verdecho, M. J., & Alarcón, F. (2008). Graphical modelling of the physical-organization view for the collaborative planning process. In *II International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management* (pp. 1695-1704).
- [319]Flynn, B. B., & Flynn, E. J. (1999). Information-processing alternatives for coping with manufacturing environment complexity. *Decision Sciences*, 30(4), 1021-1052.
- [320]Schuh, G. (2013). *Lean innovation*. Springer-Verlag.
- [321]Abad, R. C. (2002). *Introducción a la simulación ya la teoría de colas*. Netbiblo.
- [322]De Paiva, J. R. B., Gomes, V. M., Rodrigues, B. A., Silva, L. F. A., Aniceto, B. C. M., Furriel, G. P., & Calixto, W. P. (2017). Metric for Calculation of System Complexity based on its Connections. *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, 2(1), 67-73.
- [323]Xiaoxiao, Y. A. N. G., & Zikui, L. I. N. (2019, June). Supply Chain Complexity Meaning and Quantitative Research. In *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)* (pp. 971-976). IEEE.
- [324]Ucenic, C. I., & RAȚIU, C. I. (2018). Evaluation of Supply Chain Complexity At Material Flow Level For A Romanian Company. *Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, 61(3_Spe).
- [325]Wolff, J. A., & Pett, T. L. (2006). Small-firm performance: modeling the role of product and process improvements. *Journal of Small Business Management*, 44(2), 268-284.

Anexos

Anexo 1: Formato encuesta para método Índice de complejidad (CXI)

CUESTINARIO

Este cuestionario ha sido diseñado para encontrar soluciones que pueden simplificar y mejorar su trabajo. La encuesta es anónima. Al rellenar el cuestionario, es importante que tenga en cuenta una estación elegida.

Estación elegida: _____

Código del encuestado: _____

El cuestionario se refiere a: Referencias de producto, contenido de trabajo, diseño, herramientas y herramientas de apoyo e instrucciones de trabajo.

Considere qué tan bien encajan los siguientes enunciados con el trabajo que ha realizado durante el último mes en la estación elegida. La escala es del 1 al 5, donde 1 es que estoy completamente de acuerdo y 5 es que no estoy de acuerdo en absoluto.

A. Referencias de producto

1. Hay muchas Referencias diferentes en esta estación

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

2. Muchas Referencias son similares entre sí en cuanto a la función y/o la superficie

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

3. Hay muchas Referencias que rara vez se ensamblan en esta estación

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

4. Las Referencias de esta estación requieren diferentes estrategias de montaje (por ejemplo, orden, dificultad, diferente cantidad de operaciones).

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

5. Los componentes que pertenecen a las diferentes Referencias son muy similares en esta estación

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

B. Contenido del trabajo

6. Cuando trabajo en esta estación, sé qué hacer.

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

7. A menudo siento que tengo tiempo para realizar el trabajo en esta estación.

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

8. Tengo muchas otras tareas de trabajo, excepto el trabajo de montaje en esta estación (por ejemplo, manipulación de material, 5S, documentación, etc.).

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

9. Mi trabajo en esta estación a menudo se ve afectado por cambios/incertidumbres no planificados (por ejemplo, cambio de planes, nuevas instrucciones/Referencias o perturbaciones de la máquina).

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

10. Soy parte de la planificación de los cambios en esta estación.

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente			No estoy de Acuerdo	

C. Disposición

11. Esta estación está bien diseñada en cuanto a la accesibilidad

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente			No estoy de Acuerdo	

12. Esta estación está bien diseñada para trabajos de montaje con cargas pesadas.

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente			No estoy de Acuerdo	

13. Esta estación está bien definida en cuanto a la ergonomía en el trabajo de montaje (por ejemplo, estiramiento, flexión).

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente			No estoy de Acuerdo	

14. Esta estación está bien diseñada en cuanto a la fachada del material (por ejemplo, tipo de embalaje, colocación, material fácil de recoger y secuenciar).

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente			No estoy de Acuerdo	

15. La colocación de herramientas, accesorios y componentes en esta estación es generalmente buena.

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente			No estoy de Acuerdo	

D. Herramientas y herramientas de apoyo

16. Las herramientas/elementos que se utilizan en esta estación están bien ajustados para

las tareas que se realizan allí.

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente			No estoy de Acuerdo	

17. Para el montaje de las diferentes Referencias en esta estación se utilizan diferentes herramientas

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente			No estoy de Acuerdo	

18. ¿Qué herramientas de soporte se encuentran en esta estación?

- Pick-by-light (las luces son la tapa de una pieza específica)
- Códigos de barras y escáneres
- sistema RFID
- Retroalimentación de las pantallas
- Retroalimentación de las herramientas (por ejemplo, la fuerza correcta y el bit correcto)
- Puntos de control (retroalimentación en el trabajo de montaje)
- Otros _____

19. Las herramientas de apoyo mencionadas anteriormente me ayudan a llevar a cabo mi trabajo en esta estación.

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente			No estoy de Acuerdo	

E. Instrucciones de trabajo

20. A menudo leo (todos los días) las instrucciones de trabajo que se colocan en esta estación

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente			No estoy de Acuerdo	

21. Las instrucciones de trabajo son fáciles de entender

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

22. Las instrucciones de trabajo en esta estación simplifican mi trabajo

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

23. Toma mucho tiempo aprender el trabajo en esta estación (comparado con otras estaciones en mi área de equipo)

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

F. Vista general

24. En esta estación se necesita un sentimiento (conocimiento tácito) para el trabajo.

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

25. En general creo que esta estación está bien diseñada

1	2	3	4	5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De Acuerdo Completamente				No estoy de Acuerdo

Anexo 2: Programación simulación con ProModel modelo H

```

*****
* Listado del modelo formateado:
* D:\GERMAN\Promodel Modelos\H.MOD
*****

Unidades de Tiempo:      Minutos
Unidades de Distancia:   Pies
*****

*                               Locaciones                               *
*****

Nombre  Cap Unidades Estadist  Reglas  Costos
-----
Loc_1   1  1   Series de tiempo Más Tiempo, , 2/hr
Loc_2   1  1   Series de tiempo Más Tiempo, , 2/hr
Loc_3   1  1   Series de tiempo Más Tiempo, , 2/hr
Loc_4   1  1   Series de tiempo Más Tiempo, , 2/hr
Loc_5   1  1   Series de tiempo Más Tiempo, , 2/hr
Loc_6   1  1   Series de tiempo Más Tiempo, , 2/hr

*****

*                               Entidades                               *
*****

Nombre  Velocidad (Ppm) Estadist  Costos
-----
Pieza   150   Series de tiempo 1

*****

*                               Redes de Ruta                               *
*****

Nombre Tipo    T/V          Desde Hasta BI Distancia/Tiempo Factor de Velocidad
-----
R1     Sobrepasar  Velocidad & Distancia N1  N2  Bi  15.28  1
      N1  N3  Bi  24.39  1
      N4  N2  Bi  22.76  1
      N4  N3  Bi  16.05  1
R2     Sobrepasar  Velocidad & Distancia N1  N2  Bi  14.01  1
      N3  N2  Bi  21.36  1
      N1  N4  Bi  21.16  1
      N3  N4  Bi  13.87  1

*****

*                               Interfaces                               *
*****

```

Red	Nodo	Locación
R1	N1	Loc_1
	N2	Loc_3
	N3	Loc_4
	N4	Loc_2
R2	N1	Loc_3
	N2	Loc_5
	N3	Loc_4
	N4	Loc_6

 * Mapeo *

Red	Desde	Hasta	Dest
R1	N2	N1	
	N3	N1	
	N4	N2	
	N1	N2	
	N3	N4	
	N1	N3	
	N2	N4	
	N4	N3	
R2	N2	N1	
	N3	N4	
	N4	N1	
	N1	N2	
	N3	N2	
	N1	N4	
	N2	N3	
	N4	N3	

 * Recursos *

Nombre	Unidades	Estadíst	Buscar	Buscar	Ruta	Movimiento	Costos
Operator_1	1	Por Unidad	Más Cercano	Más Tiempo	R1	Vacío: 150 Ppm	1/hr
			Home: N1	Lleno: 150 Ppm			
			(Regresar)				
Operator_2	1	Por Unidad	Más Cercano	Más Tiempo	R2	Vacío: 150 Ppm	1/hr
			Home: N1	Lleno: 150 Ppm			
			(Regresar)				

* Asignaciones de Turno *

Locaciones... Recursos... Archivo de Calendario... Prioridades... Deshabilitar Lógica...

Loc_1	t1.pmc	99,99,99,99	No
Loc_2			
Loc_3			
Loc_4			
Loc_5			
Loc_6			

* Atributos *

ID	Tipo	Clasificación
HI	Real	Entidad
HS	Real	Entidad

* Variables (global) *

ID	Tipo	Valor Inicial	Estadist
Pt	Integer	0	Series De Tiempo
Tc	Real	0	Series De Tiempo
Th	Real	0	Series De Tiempo
Wip	Integer	0	Series De Tiempo
Costo_Total	Real	0	Series De Tiempo
Productividad	Real	0	Series De Tiempo

* Archivos Externos *

ID	Tipo	Nombre del Archivo Mensaje
(null)	Turno	t1.pmc

Anexo 3: Programación simulación con ProModel modelo caso estudio

 Listado del modelo formateado: *

* D:\GERMAN\Promodel Modelos\Modelo.mod *

Unidades de Tiempo: Minutos

Unidades de Distancia: Pies

* Locaciones *

Nombre	Cap	Unidades	Estadist	Reglas	Costos
--------	-----	----------	----------	--------	--------

Estación_A	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,	
------------	---	---	------------------	-------------	--

Estación_B	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,	
------------	---	---	------------------	-------------	--

Estación_C	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,	
------------	---	---	------------------	-------------	--

* Tiempos Setup por Reloj Locaciones *

Loc	Frecuencia	Primera Vez	Prioridad	Programado	Deshab	Lógica
-----	------------	-------------	-----------	------------	--------	--------

Estación_A	1440	360	99	No	No	Use Setup_1 For U(60,30) min Free Setup_1
------------	------	-----	----	----	----	--

Estación_B	1440	360	99	No	No	Use Setup_2 For U(60,30) min Free Setup_2
------------	------	-----	----	----	----	--

1440	840	99	No	No	Use Setup_2 For 30 min Free Setup_2
------	-----	----	----	----	--

Estación_C	1440	360	99	No	No	Use Setup_3 For U(60,30) min Free Setup_3
------------	------	-----	----	----	----	--

1440	840	99	No	No	Use Setup_3 For 30 min Free Setup_3
------	-----	----	----	----	--

1440	510	99	No	No	Use Setup_3 For 30 min Free Setup_3
------	-----	----	----	----	--

* Configuracion de tiempos muertos para Locaciones *

Loc	Entidad	Entidad Previa	Lógica
-----	---------	----------------	--------

Estación_A			
------------	--	--	--

* Entidades *

Nombre	Velocidad (Ppm)	Estadist	Costos
--------	-----------------	----------	--------

Materia_A	150	Series de tiempo	
-----------	-----	------------------	--

Material_B	150	Series de tiempo	
------------	-----	------------------	--

Material_C	150	Series de tiempo	
------------	-----	------------------	--

Producto_1 150 Series de tiempo
 Producto_2 150 Series de tiempo
 Producto_3 150 Series de tiempo

```
*****
*                               *
*           Redes de Ruta           *
*                               *
*****
Nombre Tipo      T/V           Desde Hasta BI Distancia/Tiempo Factor de Velocidad
-----
Red1  Sobrepasar  Velocidad & Distancia N1  N2  Bi 32.49  1
                        N2  N3  Bi 36.54  1
```

```
*****
*                               *
*           Interfaces           *
*                               *
*****

Red  Nodo  Locación
-----
Red1  N1  Estación_A
      N2  Estación_B
      N3  Estación_C
```

```
*****
*                               *
*           Recursos           *
*                               *
*****

Rec  Ent
Nombre Unidades Estadíst Buscar Buscar Ruta Movimiento Costos
-----
Setup_1 1 Por Unidad Más Cercano Más Tiempo Red1 Vacío: 150 Ppm
          Home: N1 Lleno: 150 Ppm
          (Regresar)

Setup_2 1 Por Unidad Más Cercano Más Tiempo Red1 Vacío: 150 Ppm
          Home: N2 Lleno: 150 Ppm
          (Regresar)

Setup_3 1 Por Unidad Más Cercano Más Tiempo Red1 Vacío: 150 Ppm
          Home: N3 Lleno: 150 Ppm
          (Regresar)
```

```
*****
*                               *
*           Procesamiento           *
*                               *
*****

Proceso Enrutamiento
Entidad Locación Operación Blk Salida Destino Regla Lógica de Movimiento
-----
Materia_A Estación_A Wait N(1,1) Min 1 Materia_A Estación_B First 1
Materia_A Estación_B Wait N(1,1) Min 1 Materia_A Estación_C First 1
```

Materia_A Estación_C Wait N(1,1) Min 1 Producto_1 Exit First 1
 Material_B Estación_B Wait N(1,1) Min 1 Material_B Estación_C First 1
 Material_B Estación_C Wait N(1,1) Min 1 Producto_2 Exit First 1
 Material_C Estación_C Wait N(1,1) Min 1 Producto_3 Exit First 1

 * Arribos *

Entidad Locación Cant. por Arribo Primera Vez Ocurrencias Frecuencia Lógica

 Materia_A Estación_A 1 INF 1
 Material_B Estación_B 1 INF 1
 Material_C Estación_C 1 INF 1

 * Asignaciones de Turno *

Locaciones... Recursos... Archivo de Calendario... Prioridades... Deshabilitar Lógica...

 Estación_A t1.pmcals 99,99,99,99 No
 Estación_B
 Estación_C

 * Archivos Externos *

ID Tipo Nombre del Archivo Mensaje

 (null) Turno t1.pmcals

Anexo 4: Calculo de la complejidad estática en sistema Flow Shop (FS) y Make to Stock (MTS)

		Operación	Setup	Break	Ocioso	Inactivo	Total
Ct1	Fo	18	0	2	0	0	20
	Pr	0,90	0,00	0,10	0,00	0,00	1,00
	E	0,1368	0,0000	0,3322	0,0000	0,0000	0,4690
Ct2	Fo	18	0	2	0	0	20
	Pr	0,90	0,00	0,10	0,00	0,00	1,00
	E	0,1368	0,0000	0,3322	0,0000	0,0000	0,4690
Ct3	Fo	18	0	2	0	0	20
	Pr	0,90	0,00	0,10	0,00	0,00	1,00
	E	0,1368	0,0000	0,3322	0,0000	0,0000	0,4690
M2500	Fo	16	2	2	0	0	20
	Pr	0,80	0,10	0,10	0,00	0,00	1,00
	E	0,2575	0,3322	0,3322	0,0000	0,0000	0,9219
M3000	Fo	16	2	2	0	0	20
	Pr	0,80	0,10	0,10	0,00	0,00	1,00
	E	0,2575	0,3322	0,3322	0,0000	0,0000	0,9219
Ngr350	Fo	16	2	2	0	0	20
	Pr	0,80	0,10	0,10	0,00	0,00	1,00
	E	0,2575	0,3322	0,3322	0,0000	0,0000	0,9219
Te200	Fo	16	2	2	0	0	20
	Pr	0,80	0,10	0,10	0,00	0,00	1,00
	E	0,2575	0,3322	0,3322	0,0000	0,0000	0,9219
Fungyang	Fo	17	1	2	0	0	20
	Pr	0,85	0,05	0,10	0,00	0,00	1,00
	E	0,1993	0,2161	0,3322	0,0000	0,0000	0,7476
Flowpack	Fo	17	1	2	0	0	20
	Pr	0,85	0,05	0,10	0,00	0,00	1,00
	E	0,1993	0,2161	0,3322	0,0000	0,0000	0,7476
Horno	Fo	17	1	2	0	0	20
	Pr	0,85	0,05	0,10	0,00	0,00	1,00
	E	0,1993	0,2161	0,3322	0,0000	0,0000	0,7476
Manual	Fo	18	0	2	0	0	20
	Pr	0,90	0,00	0,10	0,00	0,00	1,00
	E	0,1368	0,0000	0,3322	0,0000	0,0000	0,4690

Anexo 5: Calculo de la complejidad dinámica en sistema Flow Shop (FS) y Make to Stock (MTS)

	Ct1	Ct2	Ct3	M2500	M3000	Ngr350	Te200	Fungyang	Flowpack	Horno	Manual
CXI	1,8333	1,5417	1,6667	2,5833	3,6250	4,6667	2,3750	2,7500	4,2500	3,5000	1,4583
SE(Estática)	0,4690	0,4690	0,4690	0,9219	0,9219	0,9219	0,9219	0,7476	0,7476	0,7476	0,4690
SE(Dinámica)	0,7768	0,8250	0,7611	1,0921	1,2300	1,1979	1,0905	0,9926	1,1088	0,9143	0,6588
CH(Estática)	0,6902	0,5588	0,6354	1,1825	1,5530	2,0296	1,0880	1,1814	1,7115	1,5744	0,6065
CH(Dinámica)	1,1432	0,9829	1,0312	1,4008	2,0720	2,6371	1,2870	1,5686	2,5385	1,9256	0,8519
Ct	1,2458	1,2940	1,2301	2,0140	2,1519	2,1198	2,0124	1,7402	1,8564	1,6619	1,1278

Anexo 6: Calculo de la complejidad estática en sistema Job Shop (FS) y Make to Order (MTO)

		Torno 1	Torno 2	Torno 3	Fresadora	Soldadura	Taladro
Estatica	Operación	4,5	4,5	4,5	5,0	5,0	5,5
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
	Ocioso	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Inactivo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
	Pr	0,563	0,563	0,563	0,625	0,625	0,688
		0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188
		0,188	0,188	0,188	0,125	0,125	0,063
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063
		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	E	0,467	0,467	0,467	0,424	0,424	0,372
		0,453	0,453	0,453	0,453	0,453	0,453
		0,453	0,453	0,453	0,375	0,375	0,250
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
	Ce	1,623	1,623	1,623	1,502	1,502	1,324

Anexo 7: Calculo de la complejidad dinámica en sistema Job Shop (FS) y Make to Order (MTO)

Dinamica		Torno 1	Torno 2	Torno 3	Fresadora	Soldadura	Taladro
Dia 1	Operación	4,5	4,0	2,5	6,0	5,5	4,0
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	0,5	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5
	Ocioso	1,0	1,5	3,5	-0,5	0,5	1,5
	Inactivo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Dia 2	Operación	1,5	0,0	2,0	5,0	3,5	3,8
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	0,5	0,0	1,0	0,5	0,5	0,5
	Ocioso	4,0	3,2	3,0	0,5	2,0	1,7
	Inactivo	0,5	3,3	0,5	0,5	0,5	0,5
Dia 3	Operación	5,5	5,3	4	5,4	5,8	4,7
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	0,3	0,7	0	0,6	0,2	0,1
	Ocioso	0,2	0	2	0,0	0,0	1,2
	Inactivo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Dia 4	Operación	3,2	2,3	0,0	4,8	5,3	5,8
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	0,5	0,5	0,0	0,7	0,7	0,2
	Ocioso	2,3	3,2	3,5	0,5	0,0	0,0
	Inactivo	0,5	0,5	3,0	0,5	0,5	0,5
Dia 5	Operación	4,9	0,0	4,3	5,5	5,2	0,0
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	0,8	0,0	0,2	0,5	0,4	0,0
	Ocioso	0,3	6,0	1,5	0,0	0,4	6,0
	Inactivo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Dia 6	Operación	3,2	2,3	3,6	5,5	4,1	3,1
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	0,6	0,5	0	0,5	0,3	0,4
	Ocioso	2,2	3,2	2,4	0	1,6	2,5
	Inactivo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Dia 7	Operación	4	5	5	5,1	1	5,2
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	0,6	0,4	1	0,9	0,3	0,8
	Ocioso	1,4	0,6	0	0	1,8	0
	Inactivo	0,5	0,5	0,5	0,5	3,4	0,5
Dia 8	Operación	5,2	5	3,5	2,3	4,9	5
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

	Setup	0,8	1	0,5	0,7	1,1	1
	Ocioso	0	0	2	0,2	0	0
	Inactivo	0,5	0,5	0,5	3,3	0,5	0,5
Dia 9	Operación	5,6	5,5	3,9	5,3	5,2	5,3
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	0,4	0,5	0,2	0,3	0,8	0,7
	Ocioso	0	0	1,9	0,4	0	0
	Inactivo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Dia 10	Operación	5,3	5,1	4,7	4,7	5	4,5
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	0,7	0,9	1,1	0,7	0,9	1,5
	Ocioso	0	0	0,2	0,6	0,1	0
	Inactivo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Dia 11	Operación	5,4	5,2	4,7	2,6	5,2	5,3
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	0,6	0,8	0,5	0,7	0,8	0,6
	Ocioso	0	0	0,8	2,7	0	0,1
	Inactivo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Dia 12	Operación	5,1	5,7	2,4	3,4	5,4	5,4
	Break	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Setup	0,7	0,3	1,1	0,7	0,4	0,5
	Ocioso	0,2	0	2,5	1,9	0,2	0,1
	Inactivo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

	Torno 1	Torno 2	Torno 3	Fresadora	Soldadura	Taladro
Operación	53,4	45,4	40,6	55,6	56,1	52,1
Break	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Setup	7,0	6,1	5,6	7,3	6,4	6,8
Ocioso	11,6	17,7	23,3	6,3	6,6	13,1
Inactivo	6,0	8,8	8,5	8,8	8,9	6,0
Total	96	96	96	96	96	96
Pr	0,556	0,473	0,423	0,579	0,584	0,543
	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188
	0,073	0,064	0,058	0,076	0,067	0,071
	0,121	0,184	0,243	0,066	0,069	0,136
	0,063	0,092	0,089	0,092	0,093	0,063
E	0,471	0,511	0,525	0,457	0,453	0,479
	0,453	0,453	0,453	0,453	0,453	0,453
	0,275	0,253	0,239	0,283	0,260	0,271
	0,368	0,450	0,496	0,258	0,266	0,392
	0,250	0,316	0,310	0,316	0,318	0,250
Cd	1,817	1,982	2,022	1,766	1,750	1,844

Anexo 8: Calculo de la complejidad por medio método hibrido en sistema Job Shop (FS) y Make to Order (MTO)

	Torno 1	Torno 2	Torno 3	Fresadora	Soldadura	Taladro
CXI	3,0833	3,0833	2,9167	2,7500	2,4167	2,7500
SE(Estática)	1,6226	1,6226	1,6226	1,5016	1,5016	1,3245
SE(Dinámica)	1,8174	1,9821	2,0225	1,7661	1,7502	1,8440
CH(Estática)	1,4544	1,3879	1,2983	1,2637	1,1160	1,1495
CH(Dinámica)	1,6290	1,6955	1,6183	1,4863	1,3007	1,6005
Ct	3,4399	3,6047	3,6450	3,2677	3,2518	3,1685