

“ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE LABORATORIO
PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE BOBINAS DE
ALAMBRES ESMALTADOS, USANDO TÉCNICAS
LEAN, TEORÍA DE RESTRICCIONES Y
SIMULACIÓN DINÁMICA, EN UNA EMPRESA DE
FABRICACIÓN DE CABLES ELÉCTRICOS”

Proyecto Integrador realizado por:

ESCUADERO RAMÍREZ MIGUEL ÁNGEL

**Presentado a la Facultad de Ciencias Sociales y Humanísticas de la
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)**

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN NEGOCIOS INTERNACIONALES

Director de Proyecto: Ph.D. Víctor Hugo González Jaramillo

Septiembre 2016

RESUMEN

La compañía ELECTROCABLES C.A. tiene un laboratorio de esmaltado donde se realizan pruebas de control de calidad a las bobinas usando equipos dedicados a este fin. El problema se origina porque se ingresan 40 bobinas en promedio por día desde la planta, pero sólo se llega a inspeccionar a lo mucho 16 de ellas en promedio en una jornada de trabajo de 8 horas, aunque la demanda diaria le exige entre 20 a 21 bobinas según datos históricos. La metodología que se utiliza para el mejoramiento de estos procesos es mediante la aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones (TOC) usando el modelo de Simplified Drum-Buffer-Rope (S-DBR).

En la primera sección se aborda la introducción donde se detallan los antecedentes relacionados al tema de investigación, objetivos, justificación y el alcance del estudio.

En la segunda sección se realiza la revisión literaria que apoya y sustenta el desarrollo de una adecuada metodología en base a artículos científicos ya elaborados.

En la tercera sección se explica la metodología en base a la segunda sección.

En la cuarta sección se desarrolla la metodología, se usan dos programas informáticos: @risk y Vensim, la primera se utiliza para distribuciones de los datos recopilados y la segunda para realizar los diagramas causales, modelo actual, análisis de sensibilidad y el diseño del modelo optimizado por medio de dos escenarios.

En la quinta sección se explican los resultados según las simulaciones realizadas en la cuarta sección.

Por último, la sexta sección trata de las conclusiones y recomendaciones.

DEDICATORIA

A

Dios, por darme la oportunidad de culminar con éxito esta gran etapa de mi vida, por brindarme salud, sabiduría, inteligencia y fortaleza para finalizar con gran satisfacción esta invaluable tesis que me costó varios desvelos.

Mis padres, Miguel y Gina, por sus valiosos consejos, amor y apoyo incondicional en todos los aspectos desde cuando nací, y fueron, son y serán mis pilares fundamentales de mi vida. Los amo con todo mi corazón y no olvidaré todo lo que han hecho por mí.

Mi futura esposa e hijos(as) que aún no los(as) conozco pero que en alguna parte de este mundo sé que Dios me los(as) guarda, porque son mi gran proyecto de vida y el día en que los(as) tenga seré el hombre más feliz y, por tanto, no pierdo las esperanzas.

ESPOL, mi segundo hogar, por brindarme una formación académica de excelencia, porque fuiste, eres y serás mi “alma máter” y estarás en mi corazón por siempre independientemente del país en que me pueda encontrar en un futuro si Dios lo permite.

“Y cuando el varón vio que no podía con él, tocó en el sitio del encaje de su muslo, y se descoyuntó el muslo de Jacob mientras con él luchaba. Y dijo: Déjame, porque raya el alba. Y Jacob le respondió: No te dejaré, si no me bendices.” (Génesis 32:25-26)

Miguel Ángel Escudero Ramírez

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto rompió paradigmas de tesis que normalmente se desarrollan en mi carrera profesional. Su nivel de dificultad en cuanto a su contenido se refiere fue alto, pero no fue imposible para finalizarlo, porque la clave de haberlo culminado con éxito fue por medio del pensamiento divergente para convertir algo ordinario en extraordinario.

En primer lugar, agradezco a mi Señor Jesucristo por darme el coraje suficiente para poder desarrollar una tesis de esta magnitud que sin duda alguna fue tan gratificante.

Agradezco a mis padres porque me dieron consejos de superación e inspiración. Agradezco al Ph.D. Víctor Hugo González Jaramillo porque fue, es y será mi líder y un gran ejemplo a seguir, quien me brindó conocimientos muy inestimables sin restricción.

Agradezco al Ing. Carlos Enrique Ramírez González por extenderme los permisos pertinentes para desarrollar mi tesis de grado en la empresa ELECTROCABLES C.A. Agradezco al Ing. Leonardo Heriberto García Preciado por su apoyo en la recolección de datos in situ para poder alimentar mi modelo de simulación y obtener resultados.

Agradezco al Ing. Ramón Espinoza y al Ing. Samuel Espinoza porque me extendieron algunos permisos para ausentarme en mi puesto de trabajo sin ser despedido.

Agradezco a todos los maestros que aportaron con mi desarrollo intelectual.

“Toda persona debe decidir una vez en su vida si se lanza a triunfar, arriesgándolo todo, o si se sienta a ver el paso de los triunfadores.” (Thomas Edison 1847-1931)

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.” (Albert Einstein 1879-1955)

Miguel Ángel Escudero Ramírez

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponden exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual.

Miguel Ángel Escudero Ramírez

SIGLAS Y ABREVIATURAS

NEMA	National Electrical Manufacturers Association
S-DBR	Simplified Drum-Buffer-Rope

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	vi
TABLA DE CONTENIDO	vii
LISTADO DE FIGURAS	x
LISTADO DE TABLAS	xvi
LISTADO DE ECUACIONES.....	xviii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. PROBLEMA	4
1.3. OBJETIVOS	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. JUSTIFICACIÓN	6
1.5. ALCANCE DEL ESTUDIO	7
2. REVISIÓN LITERARIA.....	8
2.1. DESPERDICIOS EXISTENTES EN EMPRESAS.....	8
2.2. METODOLOGÍA DE TÉCNICAS LEAN.....	17
2.3. TEORÍA DE RESTRICCIONES	24
2.4. LEAN MANUFACTURING Y TEORÍA DE RESTRICCIONES	26
2.5. DINÁMICA DE SISTEMAS.....	27
2.6. TEORÍA DE RESTRICCIONES Y DINÁMICA DE SISTEMAS	34
3. METODOLOGÍA	47
3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	47
3.2. RECOLECCIÓN DE DATOS DE TIEMPOS DE PRUEBAS DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE CALIDAD	48

3.2.1.	Nivel de investigación	48
3.2.2.	Diseño de investigación	49
3.2.3.	Selección de la muestra.....	49
3.2.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	50
3.2.5.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	50
3.3.	CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO ACTUAL.....	51
3.3.1.	Identificación de las variables y/o constantes.....	51
3.3.2.	Identificación de las relaciones causa-efecto entre las variables.....	51
3.4.	PROGRAMACIÓN DEL MODELO ACTUAL POR COMPUTADORA.....	52
3.5.	CALIBRADO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO ACTUAL	53
3.6.	VALIDACIÓN DEL MODELO ACTUAL.....	53
3.7.	PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS (CREACIÓN DE ESCENARIOS)	53
3.7.1.	Diseño optimizado del modelo por medio de técnicas lean y teoría de restricciones	53
3.7.2.	Simulación dinámica de sistemas	53
3.7.3.	Presentación de resultados y toma de decisiones.....	54
4.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA – CASO DE ESTUDIO	55
4.1.	RECOLECCIÓN DE DATOS DE TIEMPOS DE PRUEBAS DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE CALIDAD	55
4.2.	CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO ACTUAL.....	66
4.2.1.	Equipos de control de calidad de bobinas.....	68
4.2.1.1.	Prueba de Choque Térmico.....	68
4.2.1.2.	Prueba de Resistencia de Aislamiento	70
4.2.1.3.	Prueba de Continuidad.....	71
4.2.1.4.	Prueba de Rigidez Dieléctrica.....	72
4.2.1.5.	Prueba de Elongación	73
4.2.1.6.	Prueba de Diámetro	74
4.2.2.	Lista de variables y especificaciones en el modelo actual.....	74
4.2.3.	Diagramas causales del modelo actual	78
4.2.3.1.	Diagrama causal de inicio.....	78
4.2.3.2.	Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Choque Térmico.	81
4.2.3.3.	Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Resistencia de Aislamiento.....	84
4.2.3.4.	Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Continuidad.....	87
4.2.3.5.	Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Rigidez Dieléctrica	91

4.2.3.6. Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Elongación	95
4.2.3.7. Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Diámetro	100
4.2.3.8. Diagrama causal de todos los procesos de control de calidad de bobinas	105
4.3. PROGRAMACIÓN DEL MODELO ACTUAL POR COMPUTADORA...	107
4.4. CALIBRADO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO ACTUAL	107
4.4.1. Calibrado.....	107
4.4.2. Análisis de sensibilidad	108
4.5. VALIDACIÓN DEL MODELO ACTUAL.....	117
4.6. PROPUESTA PARA EL MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS A PARTIR DEL MODELO ACTUAL	121
4.6.1. Diseño optimizado del modelo mediante la aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones (S-DBR)	121
4.6.2. Simulación dinámica de sistemas	125
5. RESULTADOS - CASO DE ESTUDIO	133
5.1. ANÁLISIS DE ESCENARIOS Y ESTRATEGIAS.....	133
5.1.1. Escenario Inicial del modelo.....	133
5.1.2. Escenario 1 con aplicación de técnicas Lean y TOC S-DBR.....	133
5.1.3. Escenario 2 con aplicación de técnicas Lean y TOC S-DBR.....	138
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	141
6.1. Conclusiones	141
6.2. Recomendaciones.....	141
REFERENCIAS.....	143
APÉNDICE A.....	146
APÉNDICE B	147

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Logo de la compañía	3
Figura 2: Un modelo funcional de PlasticCo antes de la aplicación de una nueva estrategia de gestión de desperdicios	11
Figura 3: Un modelo funcional de PlasticCo después de la aplicación de una nueva estrategia de gestión de desperdicios	12
Figura 4: Comprensión del Lean Manufacturing	18
Figura 5: Beneficios del Lean Manufacturing.....	19
Figura 6: Obstáculos de la implementación de Lean Manufacturing.....	21
Figura 7: Pasos sugeridos para la aplicación de la metodología	22
Figura 8: Supplier Kaizen framework	23
Figura 9: Pasos del Supplier Kaizen.....	23
Figura 10: Modelo Drum-Buffer-Rope tradicional	26
Figura 11: Modelo Drum-Buffer-Rope simplificado	27
Figura 12: Diagrama causal de costo de calidad	28
Figura 13: Diagrama causal de los factores de costo	28
Figura 14: Diagrama causal de los detalles de factores de costo	29
Figura 15: Diagrama causal en el software Vensim	30
Figura 16: Relación entre los costos de conformidad y los de inconformidad	31
Figura 17: Diagrama COQ – Cero costos de prevención y de evaluación	32
Figura 18: Los efectos de diferentes costos de calidad de prevención y evaluación...	33
Figura 19: Un modelo de un Sistema de Producción Simple.....	35
Figura 20: Tiempo para alcanzar bienes terminados de 5 igual a 1275 minutos, o 21,25 horas.....	37

Figura 21: Gráfica de tiempo que produce 5 unidades de bienes terminados, Tiempo = 1,275 min	37
Figura 22: Modelo en Stella con retroalimentación y Buffer	38
Figura 23: Salida parcial del modelo en Stella sin Buffer	39
Figura 24: Gráfica de tiempo que produce 5 unidades de bienes terminados con TOC 40	
Figura 25: Resultados de gráficos de patrones de flujo de material (Parte 1/3).....	41
Figura 26: Resultados de gráficos de patrones de flujo de material (Parte 2/3).....	42
Figura 27: Resultados de gráficos de patrones de flujo de material (Parte 3/3).....	43
Figura 28: Efecto que TOC tiene en los trabajos en proceso de inventarios (Parte 1/3)	44
Figura 29: Efecto que TOC tiene en los trabajos en proceso de inventarios (Parte 2/3)	45
Figura 30: Efecto que TOC tiene en los trabajos en proceso de inventarios (Parte 3/3)	46
Figura 31: Proceso del marco metodológico e implementación que se utilizará en este trabajo de investigación	47
Figura 32: Representación matemática entre la relación de la variable d flujo con la variable de estado.....	51
Figura 33: Diagrama causal o de influencias del proceso de propagación de una epidemia.....	52
Figura 34: F1 Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Choque Térmico según la prueba Chi-cuadrado.....	56
Figura 35: Comparación de ajuste (Chi-cuadrado) para tiempos de pruebas de Choque Térmico.....	56

Figura 36: Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Resistencia de Aislamiento según la prueba Chi-cuadrado.....	57
Figura 37: Comparación de ajuste (Chi-cuadrado) para tiempos de pruebas de Resistencia de Aislamiento.....	58
Figura 38: Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Continuidad según la prueba Chi-cuadrado.....	59
Figura 39: Comparación de ajuste (Chi-cuadrado) para tiempos de pruebas de Continuidad.....	60
Figura 40: Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Rigidez Dieléctrica según la prueba Chi-cuadrado.	61
Figura 41: Comparación de ajuste (Chi-cuadrado) para tiempos de pruebas de Rigidez Dieléctrica.....	62
Figura 42: F9 Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Elongación según la prueba Chi-cuadrado.....	63
Figura 43: Comparación de ajuste (Chi-cuadrado) para tiempos de pruebas de Elongación	64
Figura 44: Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Diámetro según la prueba Chi-cuadrado.	65
Figura 45: Comparación de ajuste (Chi-cuadrado) para tiempos de pruebas de Diámetro	66
Figura 46: Diagrama de procesos para el control de calidad de bobinas	67
Figura 47: Equipo de Choque Térmico	69
Figura 48: Equipo de Resistencia de Aislamiento.....	70
Figura 49: Equipo de Continuidad	71
Figura 50: Equipo de Rigidez Dieléctrica	72

Figura 51: Equipo de Elongación	73
Figura 52: Equipo de Diámetro	74
Figura 53: Diagrama causal de inicio	80
Figura 54: Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Choque Térmico...	83
Figura 55: Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Resistencia de Aislamiento.....	86
Figura 56: Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Continuidad	90
Figura 57: Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Rigidez Dieléctrica	94
Figura 58: Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Elongación	99
Figura 59: Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Diámetro.....	104
Figura 60: Diagrama causal de todos los procesos de control de calidad de bobinas .	106
Figura 61: Vensim PLE Plus	107
Figura 62: Ventana para la configuración de la sensibilidad de la simulación	108
Figura 63: Gráfico de sensibilidad de cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad.....	111
Figura 64: Gráfico de sensibilidad (trayectorias individuales) de cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad.....	112
Figura 65: Gráfico de sensibilidad de cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas	113
Figura 66: Gráfico de sensibilidad (trayectorias individuales) de cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas	114
Figura 67: Gráfico de sensibilidad tiempo que descansa el empleado por cambio de ciclo de las pruebas	115
Figura 68: Gráfico de sensibilidad (trayectorias individuales) tiempo que descansa el empleado por cambio de ciclo de las pruebas.....	116

Figura 69: Sección del modelo completo y optimizado donde se controla el ritmo de trabajo para el mejoramiento de los procesos mediante aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones.....	122
Figura 70: Sección del modelo completo y optimizado donde es controlado el ritmo de trabajo para el mejoramiento de los procesos a causa de la aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones (S-DBR)	123
Figura 71: Modelo completo y optimizado mediante la aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones (Simplified Drum-Buffer-Rope)	124
Figura 72: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Choque Térmico.....	126
Figura 73: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Resistencia de Aislamiento	127
Figura 74: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Continuidad	128
Figura 75: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Rigidez Dieléctrica.....	129
Figura 76: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Elongación	130
Figura 77: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Diámetro.....	131
Figura 78: Output de gráfico de la variable cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad.....	132
Figura 79: Outputs de gráficos del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR aplicado) para el escenario 1 (20 bobinas) respecto a la demanda	136

Figura 80: Outputs de gráficos del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR aplicado) para el escenario 1 (20 bobinas) respecto a una jornada de trabajo..... 137

Figura 81: Outputs de gráficos del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR aplicado) para el escenario 2 (21 bobinas) respecto a la demanda o una jornada 140

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Flujos iniciales de desperdicios por proceso (toneladas)	13
Tabla 2: Flujos finales de desperdicios por proceso (toneladas)	13
Tabla 3: Categorización de relación directa para los tipos de desperdicios	14
Tabla 4: Matriz de relación de desperdicios (WRM)	15
Tabla 5: Valores de la matriz de desperdicios	16
Tabla 6: Análisis de evaluación de resultados de la compañía.....	16
Tabla 7: Perfiles de compañías encuestadas	18
Tabla 8: Herramientas utilizadas por las compañías encuestadas	20
Tabla 9: Ranking de herramientas según el número de años de implementación de Lean Manufacturing.....	20
Tabla 10: Tiempos de procesos y secuencias de producción de una luz típica	26
Tabla 11: Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Choque Térmico y de las distribuciones ajustadas Triangular y Exponencial.	55
Tabla 12: Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Resistencia de Aislamiento y de las distribuciones ajustadas Gaussiana Inversa y Exponencial.	57
Tabla 13: T3 Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Continuidad y de las distribuciones ajustadas de Laplace y Triangular.	59
Tabla 14: T4 Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Rigidez Dieléctrica y de las distribuciones ajustadas de Laplace y Gamma.	61
Tabla 15: Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Elongación y de las distribuciones ajustadas Log-logística y Exponencial.....	63

Tabla 16: Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Diámetro y de las distribuciones ajustadas Exponencial y Triangular.	65
Tabla 17: Clasificación de las variables de nivel y de flujo del modelo actual.....	75
Tabla 18: Clasificación de las variables auxiliares del modelo actual	76
Tabla 19: Clasificación de las constantes del modelo actual.....	77
Tabla 20: Listado de Constantes involucradas en el modelo actual con sus respectivos	107
Tabla 21: Resultados del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR) para el escenario inicial o actual.....	133
Tabla 22: Resultados del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR) para el primer escenario y sus 16 estrategias.....	135
Tabla 23: Resultados del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR) para el segundo escenario y sus 16 estrategias	139

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1: Parámetro “Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas” con distribución Triangular	109
Ecuación 2: Parámetro “Tiempo que descansa el empleado por cambio del ciclo de las pruebas” con distribución Normal	109
Ecuación 3: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Choque Térmico” con distribución Triangular.....	109
Ecuación 4: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Resistencia de Aislamiento” con distribución Exponencial	109
Ecuación 5: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Continuidad” con distribución Triangular	109
Ecuación 6: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Rigidez Dieléctrica” con distribución Gamma.....	109
Ecuación 7: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Elongación” con distribución Exponencial	109
Ecuación 8: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Diámetro” con distribución Exponencial	109
Ecuación 9: Parámetro “Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra” con distribución Uniforme	109
Ecuación 10: Parámetro “Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Continuidad” con distribución Uniforme	110
Ecuación 11: Parámetro “Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Rigidez Dieléctrica” con distribución Uniforme ..	110

Ecuación 12: Parámetro “Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Elongación” con distribución Uniforme.....	110
Ecuación 13: Parámetro “Tiempo que dura el lunch” con distribución Triangular.....	110
Ecuación 14: Ciclo de bobinas no revisadas debido al lunch (variable auxiliar)	117
Ecuación 15: Horas de trabajo (variable auxiliar)	117
Ecuación 16: Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar).....	117
Ecuación 17: Tiempo que dura el ciclo de las pruebas excluyendo la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar)	117
Ecuación 18: Tiempo que dura el proceso de prueba de Choque Térmico para las bobinas (variable auxiliar)	117
Ecuación 19: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Choque Térmico para las bobinas (variable auxiliar)	117
Ecuación 20: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Choque Térmico (variable de flujo).....	118
Ecuación 21: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Choque Térmico (variable de nivel)	118
Ecuación 22: Tiempo inicial del proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento (variable auxiliar).....	118
Ecuación 23: Tiempo que dura el proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas (variable auxiliar).....	118
Ecuación 24: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas (variable auxiliar).....	118
Ecuación 25: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Resistencia de Aislamiento (variable de flujo)	118

Ecuación 26: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Resistencia de Aislamiento (variable de nivel).....	118
Ecuación 27: Tiempo inicial del proceso de prueba de Continuidad (variable auxiliar)	118
Ecuación 28: Tiempo que dura el proceso de prueba de Continuidad para las bobinas (variable auxiliar).....	119
Ecuación 29: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Continuidad para las bobinas (variable auxiliar).....	119
Ecuación 30: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Continuidad (variable de flujo).....	119
Ecuación 31: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Continuidad (variable de nivel)	119
Ecuación 32: Tiempo inicial del proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica (variable auxiliar).....	119
Ecuación 33: Tiempo que dura el proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica para las bobinas (variable auxiliar)	119
Ecuación 34: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Rigidez Dieléctrica para las bobinas (variable auxiliar)	119
Ecuación 35: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Rigidez Dieléctrica (variable de flujo).....	119
Ecuación 36: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Rigidez Dieléctrica (variable de nivel)	119
Ecuación 37: Tiempo inicial del proceso de prueba de Elongación (variable auxiliar)	120

Ecuación 38: Tiempo que dura el proceso de prueba de Elongación para las bobinas (variable auxiliar).....	120
Ecuación 39: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Elongación para las bobinas (variable auxiliar).....	120
Ecuación 40: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Elongación (variable de flujo).....	120
Ecuación 41: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Elongación (variable de nivel)	120
Ecuación 42: Tiempo inicial del proceso de prueba de Diámetro (variable auxiliar) .	120
Ecuación 43: Tiempo que dura el proceso de prueba de Diámetro para las bobinas (variable auxiliar).....	120
Ecuación 44: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Diámetro para las bobinas (variable auxiliar).....	120
Ecuación 45: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Diámetro (variable de flujo).....	121
Ecuación 46: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Diámetro (variable de nivel)	121
Ecuación 47: Cantidad de bobinas inspeccionadas por las pruebas de control de calidad (variable auxiliar).....	121

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

En la industria de fabricación de artículos eléctricos y electrónicos en el Ecuador, las utilidades sobre los ingresos en el año 2015 fueron del 7,91% en promedio, donde la empresa a analizar durante esta investigación tuvo el 6,58% de utilidades respecto a sus ventas, siendo sus ingresos de \$68.323.256 aproximadamente en ese mismo año. (Ekos, 2015)

Imponer la calidad sobre el precio en el mundo manufacturero de cables y conductores eléctricos es desafiante debido al alto nivel de competencia. Y aunque se trata de un signo común para todos los mercados, propio de la globalización, particularmente en esta industria está fuertemente acentuado por la competencia establecida entre fabricantes locales y compañías internacionales. Sin embargo, estos actores deben sumar a la lista de competidores a empresas que no siempre cumplen con normas de calidad y que valiéndose del precio como su principal arma han erosionado el negocio. (Narvarte, y otros, 2004)

Es evidente que la calidad de los productos y/o servicios en la industria de cables y conductores eléctricos es el factor preponderante que mediante la aplicación de estrategias de diferenciación y utilización de las herramientas de una metodología llamada Lean Manufacturing que aporta valor agregado en la mejora de procesos.

Según (Luzardo Mota , 2014) la implementación de un sistema de Mantenimiento Productivo Total o TPM (siglas en inglés) en la sección de esmaltado en una empresa de fabricación de cables eléctricos, llevaría el control de los indicadores de eficiencia del equipo.

Para su implementación, en primer lugar, se hizo un estudio en esa sección de la empresa, se analizó los tiempos improductivos por fallas mecánicas o paralizaciones imprevistas por las maquinarias donde en el año 2007 fueron de 1426 horas con 17 minutos, este problema se originó por la carencia de un estricto departamento de mantenimiento, provocando de esta manera un impacto negativo a la organización, obteniéndose pérdidas de \$265.719,48 anuales. (Luzardo Mota , 2014)

La propuesta de mejora estimó aumentar la eficiencia global de la sección de esmaltado en un 50% para el primer año de implementación hasta llegar al 100% en el tercer año. (Meta a corto plazo). (Luzardo Mota , 2014)

La inversión total para dicha propuesta de mejora ascendió a un monto de \$170.918 de los cuales la inversión fija inicial correspondía el 70% de dicho monto y la diferencia destinada para los costos de operación, teniendo un costo beneficio de \$1,20 de utilidad por cada dólar que la empresa invierta. (Luzardo Mota , 2014)

Dicha propuesta tendría una tasa interna de retorno TIR del 82,42% que al ser comparado con el 13,5% de la tasa referencial considerada en el análisis, generaría un VAN de \$205.482,07 que por ende existiría factibilidad económica en su implementación, se determinó un tiempo de recuperación de 1 año y medio frente a los 3 años de la propuesta, por este motivo se recomendó la ejecución de dicha propuesta planteada. (Luzardo Mota , 2014)

Por todo lo expuesto anteriormente se recomendó que la alta dirección de esa empresa debía establecer estrategias que permitan concientizar al personal respecto a la metodología del TPM en base a las 5S, explicando los beneficios que obtuviesen, para que de esta manera todos y cada uno de ellos mantengan un compromiso y cuya visión estaría encaminada al desarrollo propio y el de la organización, involucrando totalmente

a la dirección no solamente con la asignación de los recursos sino también con el seguimiento y presencia en las fases de implementación. (Luzardo Mota , 2014)

Se elaboró de un cronograma de mantenimiento preventivo a los equipos automáticos en la sección de esmaltado para conservar su vida útil, logrando aumentar la eficiencia global de dichos equipos, obteniendo una buena disponibilidad, desempeño y sobre todo la calidad, factor muy importante para garantizar la satisfacción del cliente. (Luzardo Mota , 2014)

Finalmente se sugirió realizar reuniones generales para que los diferentes equipos de mejora de producción, mantenimiento y calidad, presenten sus trabajos y avances con una frecuencia definida, para que de esta manera se pueda difundir a mejoras de cada grupo al resto del personal. (Luzardo Mota , 2014)

La empresa sujeta a análisis durante toda la investigación presentada en este documento será ELECTROCABLES C.A. véase *Figura 1*, específicamente en el laboratorio de control de calidad de bobinas de alambres esmaltados.

Esta empresa inició sus actividades el 25 de septiembre de 1981, su actividad económica principal es la fabricación de cables eléctricos y afines con Registro Único de Contribuyente (RUC) 0990553742001 según la información proporcionada por el Servicio de Rentas Internas. (Véase *APÉNDICE A*)



Figura 1: Logo de la compañía
Fuente: (Electrocables C.A.)

ELECTROCABLES C.A. pone a disposición del mercado toda su gama de cables eléctricos y telefónicos, respaldados por la garantía que dan sus instalaciones, tecnología moderna y estrictos controles de calidad. Su departamento técnico, con la intención de dar seguridad y eficacia en la conducción de energía; estudia, desarrolla y controla constantemente tanto los productos ofrecidos al mercado como las materias primas necesarias para su elaboración. (Electrocables C.A., 2010)

En la actualidad posee 5 líneas de producción para la fabricación de conductores eléctricos y alambres esmaltados. Operan de forma continua en su mayor parte pero que en algunas ocasiones sus operaciones son discontinuas, según las exigencias o preferencias que los clientes tengan en dicho momento.

A continuación, se enlistará cada una de las líneas de producción detallando sus respectivos procesos:

- Línea de producción de trefilación
- Línea de producción de cableadoras
- Línea de producción de bonchadoras
- Línea de producción de extrucción
- Línea de producción de alambres esmaltados

1.2. PROBLEMA

En Ecuador, los beneficios de muchas empresas se ven reducidos por causas tales como los hábitos no deseados existentes en los mismos colaboradores, uso inadecuado de los servicios básicos que incurren a gastos innecesarios, pérdidas o mantenimiento de inventarios que podrían estar obsoletos, la no calidad de los productos y/o servicios, retrasos en la entrega de productos que ocasionan insatisfacción en los requerimientos de los clientes.

Uno de los factores más significativos relacionados con los retrasos en la entrega de productos son los tiempos improductivos, cuellos de botellas, desperdicios o residuos que dejan sus sistemas de producción, por lo general, las empresas que se dedican a la fabricación de productos, tienen laboratorios o departamentos que inspeccionan y verifican que tales productos terminados pasen por normas de calidad para su respectiva aprobación.

Este trabajo de investigación se enfocará en analizar los problemas de tiempos improductivos, cuellos de botellas y desperdicios que se producen en el laboratorio de control de calidad de bobinas en ELECTROCABLES C.A., y que mediante el uso de técnicas Lean, Teoría de Restricciones y simulación dinámica, se analizarán dichos problemas suscitados para tomar decisiones al respecto acorde a los resultados.

Por todo lo anterior, se hace necesario diseñar un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas en ese laboratorio, utilizando la Teoría de Restricciones y las técnicas Lean para el análisis de los procesos de pruebas de control de calidad de bobinas de alambres esmaltados.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar una propuesta de mejora de los procesos de pruebas de alambres esmaltados en el laboratorio de control de calidad de bobinas, mediante el diseño de un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas aplicando técnicas Lean y Teoría de Restricciones.

1.3.2. Objetivos específicos

- Calcular los tiempos de las pruebas de control de calidad de cada equipo y las probabilidades de bobinas defectuosas.

- Identificar y analizar los problemas de tiempos improductivos, cuellos de botellas y desperdicios que producen los equipos de pruebas de control de calidad, mediante la aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones.
- Explicar por medio de la simulación el escenario inicial de los procesos de control de pruebas con sus respectivos problemas.
- Comparar la simulación de los procesos del escenario inicial con respecto a las mejoras que se le aplicarán a las mismas.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Identificando los problemas de tiempos improductivos, cuellos de botellas y desperdicios que los equipos de pruebas producen, se hace necesario desarrollar una propuesta de mejora de procesos mediante el diseño de un modelo simulado basado en dinámica de sistemas, aplicando técnicas Lean y Teoría de Restricciones, que al aplicarlo en el laboratorio reducirá los tiempos de entrega de bobinas a bodega, provocando de esta forma un aumento en el cumplimiento de entregas de bobinas a los clientes por parte de bodega. La compañía obtendrá buenos resultados en cuanto a beneficios o utilidades se refiere, y por ende le aportará también valor agregado a sus empleados por los buenos hábitos o prácticas de trabajo que adquirirán mediante las técnicas Lean.

Dichas técnicas mencionadas son parte de las herramientas de una metodología llamada Lean Manufacturing que es utilizada y reconocida a nivel mundial como un sistema de mejoramiento de procesos que se basa en la eliminación de desperdicios y actividades que no agregan valor al producto final o servicio. Por lo tanto, con la implementación de esta propuesta, ELECTROCABLES C.A., tendría una mejora en sus procesos de pruebas de calidad obteniendo mejores resultados en la evaluación del cliente final y por ende un incremento en las ventas.

1.5. ALCANCE DEL ESTUDIO

Para la realización de este proyecto se toma como punto de partida la toma de datos de tiempos que cada equipo de prueba demora para cumplir su función. Se obtendrán 112 pruebas por equipo para determinar el tipo de distribución que siguen dichos datos, usando pruebas de bondad de ajuste.

Luego se analiza la situación actual de los procesos de pruebas de calidad mediante un modelo de simulación, para que se presente una propuesta de mejoramiento de dichos procesos, con la prueba de diferentes escenarios del modelo para que finalmente se pueda afinar lo encontrado, con la utilización de las diferentes teorías de mejora.

En última instancia, se obtienen los resultados en la simulación de los procesos de los diferentes escenarios para la toma de decisiones por parte de la empresa.

2. REVISIÓN LITERARIA

2.1. DESPERDICIOS EXISTENTES EN EMPRESAS

En el artículo científico: “*A functional model of supply chains and waste*” (Hicks C. , Heidrich, McGovern, & Donnelly, 2004) se presentó un caso de estudio de una empresa mediana llamada PlasticCo situada en Inglaterra, dedicada a la fabricación de productos de plásticos perecederos con comercialización tanto nacional como en los mercados de exportación. Hicks et al. (2004, pág. 168)

La metodología que se utilizó en este estudio fue el desarrollo de un método de modelado funcional para la representación, análisis y optimización de los flujos de materiales y costos acumulados en las cadenas de suministros tanto interna como externa, aporta también con la reducción de barreras para la gestión efectiva de desperdicios dando como resultado una comunicación más fluida entre organizaciones. Hicks et al. (2004, pág. 168)

En la *Figura 2* se puede observar el modelo funcional de los procesos actuales de fabricación de PlasticCo sin la aplicación de una gestión de reducción de desperdicios, estos procesos fueron divididos en dos departamentos: preparación de la materia prima por lotes y fabricación para la obtención del producto final. Hicks et al. (2004, pág. 171)

En el primer departamento los procesos involucrados fueron: preparación y lote. En cambio, los procesos del segundo departamento fueron: moldura, final y empaquetado. Las opciones de desperdicios fueron: reutilización, reciclaje, recuperación de energía y basura. Hicks et al. (2004, pág. 171)

El primer proceso (preparación) del primer departamento recibió 100000 [t] de materia prima donde se acumuló 5% de desperdicios, y dentro de esos desperdicios el

100% fue considerado como basura a causa de la contaminación detectada de este componente principal después de su obtención, pesaje, inspección de calidad y lavado. Hicks et al. (2004, pág. 171)

El segundo proceso (lote) de este mismo departamento recibió 95000 [t] donde se acumuló 15% de desperdicios, y dentro de esos desperdicios el 10% fue considerado como reciclaje y el 90% como basura, porque las adiciones de cantidades de materiales como disolventes y colorantes fueron incorrectas, también debido a mezclas inadecuadas para su procesamiento o la contaminación misma de esos materiales. Hicks et al. (2004, pág. 171)

Por lo tanto, el departamento de preparación de la materia prima por lotes se tuvo el 20% de desperdicios. En la *Tabla 1* se puede apreciar que en el primer proceso la basura fue de 5000 [t], en el segundo proceso el reciclaje fue de 1425 [t] y como basura 12825 [t], dando un total de desperdicios de 19250 [t] generados en este departamento. Hicks et al. (2004, pág. 171)

El primer proceso (moldura) del segundo departamento recibió 80750 [t] donde se acumuló 11% de desperdicios, y dentro de esos desperdicios el 15% fue de reciclaje y el 85% considerada basura a causa de la aparición de bordes ásperos, espesor de pared incorrectos o roturas durante la liberación del molde. Hicks et al. (2004, pág. 171)

El segundo proceso (final) de ese departamento recibió 71867 [t] donde se acumuló 3% de desperdicios, y dentro de esos desperdicios el 20% fue considerado como reutilización, 25% de reciclaje y 55% de basura a causa del recorte e inspección del molde, donde se detectó defectos en el producto que no se ajustaron a las especificaciones. Hicks et al. (2004, pág. 171)

El último proceso (empaquetado) de ese departamento recibió 69711 [t] donde se acumuló 2% de desperdicios, y dentro de esos desperdicios el 10% fue considerado

como reutilización, 15% de reciclaje y 75% de basura a causa de errores de etiquetado y daños físicos además de que algunos productos se pudieron haber perdido debido a su almacenamiento de larga duración. Hicks et al. (2004, pág. 171)

Por lo tanto, el departamento de fabricación se tuvo el 16% de desperdicios. En la *Tabla 1* se puede apreciar que en el primer proceso se recicló 1332 [t], y como basura 7551 [t], en el segundo proceso la reutilización fue de 431 [t], reciclaje de 539 [t] y como basura 1186 [t], en el último proceso se tuvo 139 [t] de reutilización, 209 [t] por reciclaje y 1045 [t] considerada como basura, dando un total de desperdicios de 12433 [t] generados en este departamento. Hicks et al. (2004, pág. 171)

La alta dirección de la empresa reconoció que los procesos actuales podrían ser mejorados por medio de las prácticas de gestión de desperdicios que tenía dos opciones estratégicas: minimización de cantidad de desperdicios (largo plazo) o la maximización del nivel de utilización de desperdicios (corto plazo) en cada uno de los procesos. Hicks et al. (2004, pág. 171)

PlasticCo consideró que las relaciones en las cadenas de suministros externas se podrían desarrollar en el corto plazo para maximizar el nivel de utilización de desperdicios mediante el incremento en la proporción de reutilización y reciclaje, dando como resultado un nivel de desperdicios en basura de menor cuantía según como se aprecia en la *Figura 3* y *Tabla 2*. Hicks et al. (2004, pág. 171)

En resumen, la gestión optó por escoger el enfoque a corto plazo porque el desarrollo de las cadenas de suministros externas para materiales secundarios proporcionó valor significativo, redujo costos e impacto ambiental de eliminación de desechos. En cambio, el enfoque a largo plazo se relacionó con la evaluación de nuevos productos, mejoras en los procesos y su impacto sobre el flujo de materiales, desperdicios físicos y el coste acumulativo. Hicks et al. (2004, pág. 174)

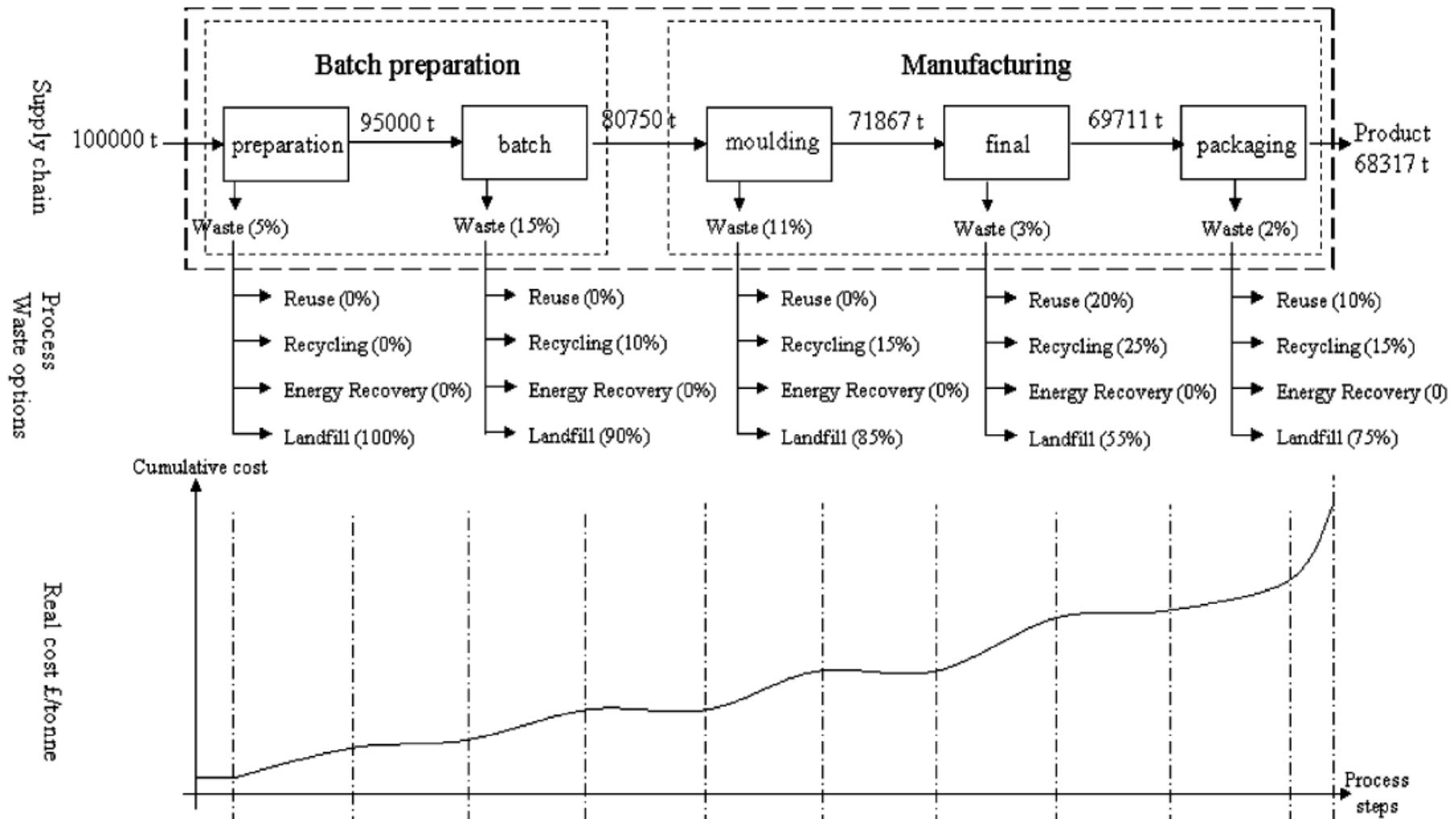


Figura 2: Un modelo funcional de PlasticCo antes de la aplicación de una nueva estrategia de gestión de desperdicios
Fuente: (Hicks C. , Heidrich, McGovern, & Donnelly, 2004)

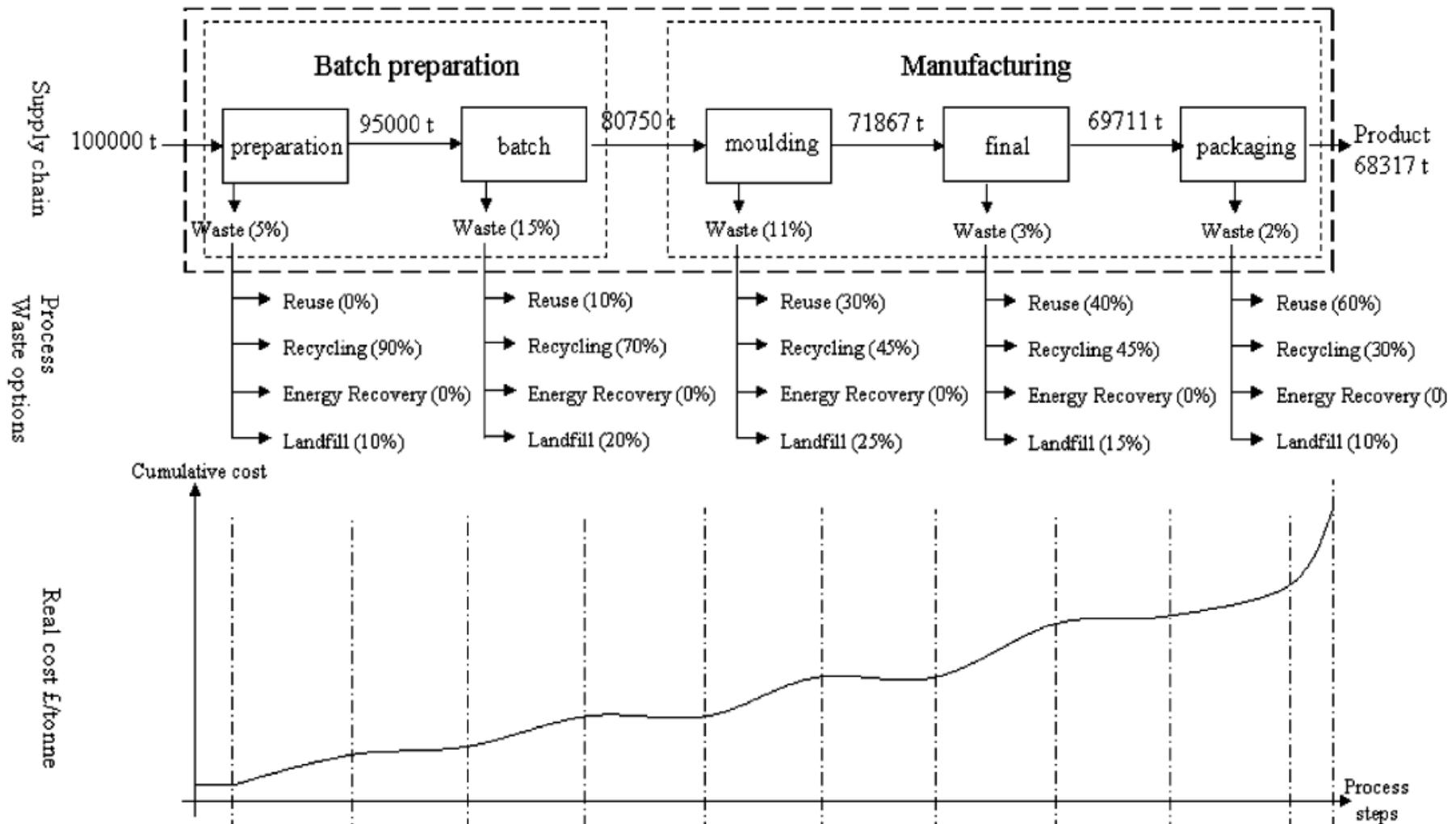


Figura 3: Un modelo funcional de PlasticCo después de la aplicación de una nueva estrategia de gestión de desperdicios
Fuente: (Hicks C. , Heidrich, McGovern, & Donnelly, 2004)

	Preparation	Batches	Moulding	Final	Packaging	Total	%
Reuse	0	0	0	431	139	570	1.8
Recycling	0	1,425	1,332	539	209	3,505	11.1
Energy recovery	0	0	0	0	0	0	0.0
Landfill	5,000	12,825	7,551	1,186	1,045	27,607	87.1
Total	5,000	14,250	8,883	2,156	1,394	31,683	100.0

Tabla 1: *Flujos iniciales de desperdicios por proceso (toneladas)*

Fuente: (Hicks C. , Heidrich, McGovern, & Donnelly, 2004)

	Preparation	Batches	Moulding	Final	Packaging	Total	%
Reuse	0	1,425	2,665	862	836	5,788	18.3
Recycling	4,500	9,975	3,997	970	418	19,860	62.7
Energy recovery	0	0	0	0	0	0	0.0
Landfill	500	2,850	2,221	323	139	6,033	19.0
Total	5,000	14,250	8,883	2,156	1,394	31,683	100.0

Tabla 2: *Flujos finales de desperdicios por proceso (toneladas)*

Fuente: (Hicks C. , Heidrich, McGovern, & Donnelly, 2004)

En el artículo científico: “*A model for the assessment of waste in job shop environments*” (Rawabdeh, 2004) se presentó un caso de estudio de una empresa mediana dedicada a la fabricación de mobiliario de acero. El flujo de los materiales está orientado al proceso y las máquinas disponibles son de tecnología de punta. (Rawabdeh, 2004, pág. 816)

La metodología que se utilizó en este estudio fue el desarrollo de un modelo de evaluación de desperdicios. Primero se realizó la identificación de los siete tipos de desperdicios, después se estableció criterios de los mismos para cuantificar el impacto que tuviesen con relación a los demás, con esas relaciones se creó una matriz de relación de desperdicios y finalmente se realizó un cuestionario (véase *APÉNDICE B*) donde sus resultados fueron combinados con dicha matriz para la obtención de resultados finales. (Rawabdeh, 2004, pág. 804)

En la *Tabla 3* se puede observar el grado de impacto para la realización de relaciones entre los tipos de desperdicios, siendo el símbolo “A” la relación absolutamente necesaria y el símbolo “U” una relación sin importancia o insignificante.

Type of relationship	Symbol
Absolutely necessary	A
Epecially important	E
Important	I
Ordinary closeness	O
Unimportant	U

Tabla 3: Categorización de relación directa para los tipos de desperdicios

Fuente: (Rawabdeh, 2004)

Según la matriz de relación de desperdicios (WRM) mostrada en la *Tabla 4*. En el sentido F/T (From/To), las relaciones consideradas como absolutamente necesarias fueron: Exceso de producción (O) con Inventario (I), Movimiento (M) con Espera (W) y Espera (W) con Inventario (I). Las relaciones especialmente importantes fueron: Exceso de producción (O) con Espera (W), Defecto (D) con Transporte (T) y

Movimiento (M) con Defecto (D). Las relaciones importantes fueron: Exceso de producción (O) con Transporte (T), Inventario (I) con Exceso de producción (O), Inventario (I) con Defecto (D), Inventario (I) con Movimiento (M), Inventario (I) con Transporte (T), entre otros. Es importante mencionar que “X” significa que la relación entre los tipos de desperdicios es nula o inexistente.

F/T	O	I	D	M	T	P	W
O	A	A	O	O	I	X	E
I	I	A	I	I	I	X	X
D	I	I	A	I	E	X	I
M	X	O	E	A	X	I	A
T	U	O	I	U	A	X	I
P	I	U	I	I	X	A	I
W	O	A	O	X	X	X	A

*Tabla 4: Matriz de relación de desperdicios (WRM)
Fuente: (Rawabdeh, 2004)*

En la *Tabla 5* se puede observar las puntuaciones de cada tipo de desperdicio según los valores definidos por la relación directa con los demás, tanto en el sentido (F/T) como (T/F) según *Tabla 4*.

En el sentido (F/T) se puede concluir que el Exceso de producción y Defecto tuvieron los mayores impactos sobre los demás tipos de desperdicios porque sus puntuaciones fueron las más altas (Score = 42), después siguió Movimiento (Score = 38), Proceso (Score = 36) e Inventario (Score = 34).

En el sentido (T/F) se puede concluir que Inventario y Espera tuvieron los mayores impactos sobre los demás tipos de desperdicios porque sus puntuaciones fueron las más altas (Score = 46) y después siguió Defecto (Score = 44).

F/T	O	I	D	M	T	P	W	Score	%
O	10	10	4	4	6	0	8	42	16.8
I	6	10	6	6	6	0	0	34	13.6
D	6	6	10	6	8	0	6	42	16.8
M	0	4	8	10	0	6	10	38	15.2
T	2	4	6	2	10	0	6	30	12
P	6	2	6	6	0	10	6	36	14.4
W	4	10	4	0	0	0	10	28	11.2
Score	34	46	44	34	30	16	46	250	100
%	13.6	18.4	17.6	13.6	12	6.4	18.4	100	

Based on A: 10, E: 8, I: 6, O: 4, U: 2, and X: 0

Tabla 5: Valores de la matriz de desperdicios

Fuente: (Rawabdeh, 2004)

En la *Tabla 6* se muestra el resumen final sobre la evaluación de resultados en conjunto con la información obtenida del cuestionario, donde la puntuación más alta fue Proceso (Score = 0,3919), pero el Factor P_j más alto fue Defecto ($17,6 * 16,8 = 295,68$) donde 17,6 y 16,8 fueron valores obtenidos de la *Tabla 5*. Se obtuvo el resultado final Y_{jfinal} donde el desperdicio Movimiento tuvo la mayor puntuación ($0,2570 * 206,72 = 53,12$) o en su equivalente el 20,9% considerado el de mayor proporción o efecto sobre los demás o afectado por ellos al mismo tiempo.

	O	I	D	M	T	P	W
Score (Y_j)	0.1126	0.1276	0.1762	0.2570	0.1683	0.3919	0.1515
P_j Factor	228.48	250.24	295.68	206.72	144	092.14	206.08
Final result (Y_{jfinal})	25.76	31.94	52.10	53.12	24.23	36.12	31.21
Final result (%)	10.1	12.6	20.5	20.9	9.5	14.2	12.3
Rank	6	4	2	1	7	3	5

Tabla 6: Análisis de evaluación de resultados de la compañía

Fuente: (Rawabdeh, 2004)

La nomenclatura de la *Tabla 6* viene dada a continuación:

j : tipo de desperdicio (O, I, D, M, T, P, W).

Y_j : factor de desperdicio inicial. Significa que cada tipo de desperdicio afecta a los demás en un determinado peso (porcentaje) o como cada tipo de desperdicio se ve afectado por otros.

P_j : probabilidad de ocurrencia o efecto de un tipo de desperdicio.

Y_{jfinal} : factor de desperdicio final. Significa que cada tipo de desperdicio puede afectar a los demás y al mismo tiempo ser afectado por otros.

2.2. METODOLOGÍA DE TÉCNICAS LEAN

En el artículo científico: “*A Study on Lean Manufacturing Implementation in the Malaysian Electrical and Electronics Industry*” (Wong, Wong, & Ali, 2009) se analizó a algunas empresas de la industria eléctrica y electrónica en Malasia. Wong et al. (2009, pág. 524), las empresas del área eléctrica tratan de aparatos domésticos eléctricos, componentes eléctricos, y productos eléctricos industriales, mientras las otras se relacionan con componentes electrónicos, electrónica industrial, y electrónica de consumo. Wong et al. (2009, pág. 526)

La metodología que se utilizó en este estudio fue mediante el desarrollo de una encuesta, las muestras fueron obtenidas del FMM-MATRADE INDUSTRY DIRECTORY (ELECTRICAL AND ELECTRONICS) 2007/2008. Se seleccionó 350 fabricantes de forma aleatoria, pero con la condición de que tuvieran información completa con detalles de contactos. Los cuestionarios fueron distribuidos vía correo postal y dirigidos a los directores de esas empresas o gerentes generales. Wong et al. (2009, pág. 524)

En la *Tabla 7* indica que el 68,18% de 44 compañías dentro de la industria eléctrica y electrónica en Malasia eran grandes y el resto de menor magnitud y el 59,09% de los productos fabricados eran eléctricos. La mayoría de los encuestados que

fueron el 52,27% mencionaron que ha adoptado Lean Manufacturing por menos de 5 años, mientras que el 29, 55% por más de 10 años.

a) Size of the companies	No. of companies	Percent
Small and medium enterprises	14	31.82
Large organizations	30	68.18
Total	44	100
b) Types of product manufactured		
Electrical	26	59.09
Electronics	18	40.91
Total	44	100
c) Number of years adopted lean manufacturing		
<5 years	23	52.27
5 - 10 years	8	18.18
>10 years	13	29.55
Total	44	100

Tabla 7: Perfiles de compañías encuestadas

Fuente: (Wong, Wong, & Ali, 2009)

Los encuestados fueron evaluados en cuanto a la comprensión del Lean Manufacturing se refiere y según como indica la *Figura 4* el 88,64% de ellos lo relacionaron con la reducción de desperdicios, el 84,09% lo asociaron con el mejoramiento continuo, sólo el 54,55% lo relacionaron con las herramientas y técnicas para la mejora en las operaciones o procesos, y como último lugar el 18,18% consideraron que el Lean Manufacturing es una forma de vida.

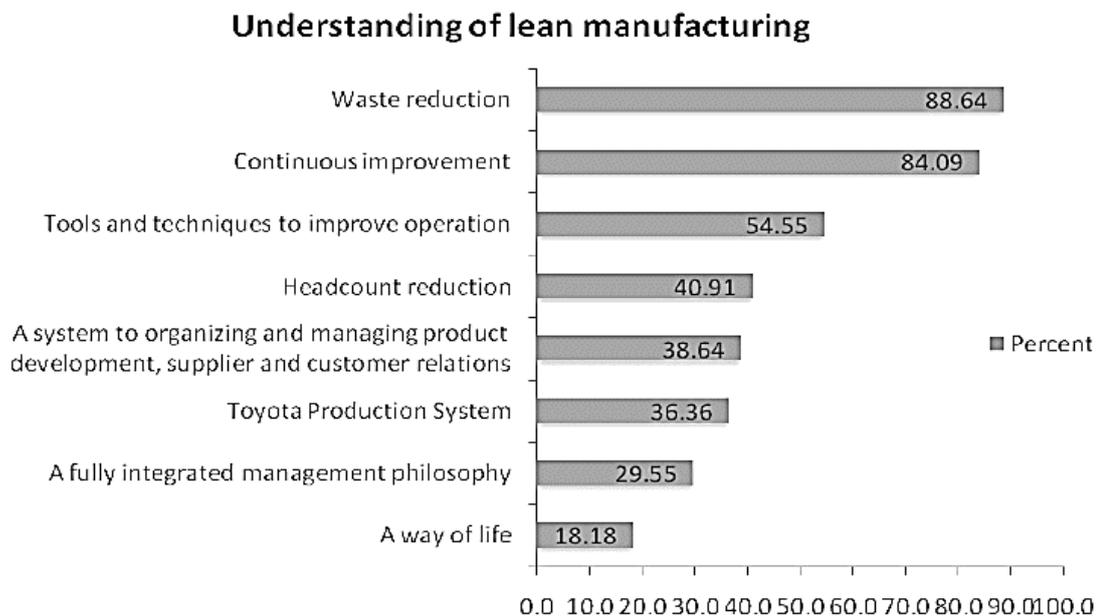


Figura 4: Comprensión del Lean Manufacturing

Fuente: (Wong, Wong, & Ali, 2009)

Los encuestados fueron evaluados en cuanto a los beneficios del Lean Manufacturing se refiere y según como indica la *Figura 5* el 88,64% de ellos lo asociaron con la reducción de costos, el 86,36% lo relacionaron con la mejora en la productividad, el 81,82% fue por reducción de desperdicios, sólo el 68,18% lo asociaron con la disminución de inventario, y como último lugar el 43,18% consideraron que el Lean Manufacturing aporta con la mejora en la flexibilidad.

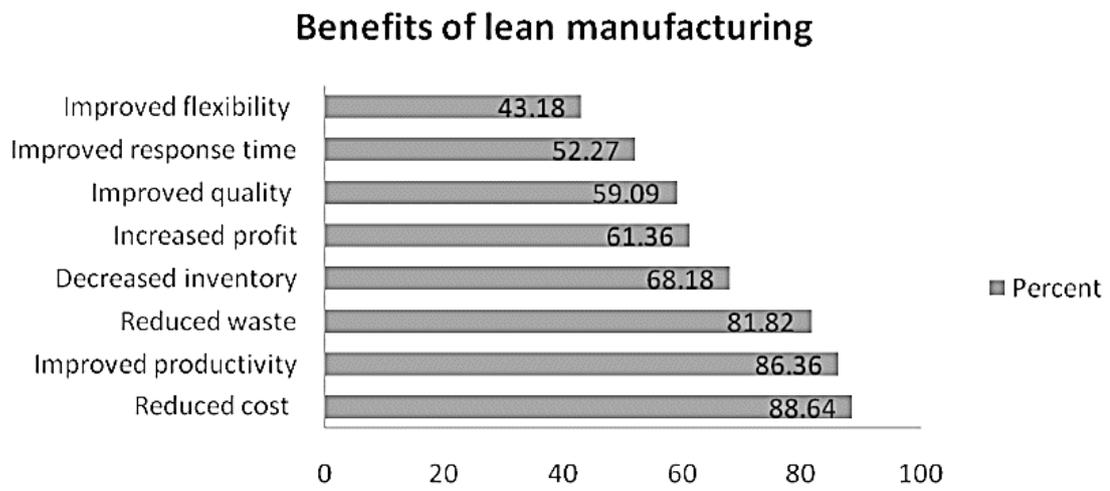


Figura 5: *Beneficios del Lean Manufacturing*
Fuente: (Wong, Wong, & Ali, 2009)

En la *Tabla 8* se muestra las posiciones asignadas a cada herramienta y técnica según la información brindada por los encuestados. Es indiscutible que 5S y Kaizen tuvieron las mejores valoraciones con 88,64% y 84,09% respectivamente, y se concluye que esas compañías mantienen la planta en condiciones agradables, limpias y en orden, pero Group Technology tuvo el último lugar y por ende con la valoración más baja (6,82%) respecto a las demás técnicas y herramientas.

Tools and Techniques	Overall %	Rank
5S	88.64%	1
Kaizen	84.09%	2
Standardized work	70.45%	3
PDCA	70.45%	3
Poka-yoke	63.64%	5
Kanban	61.36%	6
JIT	54.55%	7
TPM	54.55%	7
One piece flow	40.91%	9
TQM	40.91%	9
VSM	36.36%	11
Cellular layout	34.09%	12
Heijunka	29.55%	13
Six Sigma	27.27%	14
Andon	27.27%	14
SMED	20.45%	16
Jidoka	18.18%	17
Group Technology	6.82%	18

Tabla 8: Herramientas utilizadas por las compañías encuestadas

Fuente: (Wong, Wong, & Ali, 2009)

En la *Tabla 9* se muestra con más detalle las posiciones asignadas a cada herramienta según los años de implementación. Se observa que las herramientas más utilizadas por menos de 5 años fueron: Standardized work (82,6%), 5S (78,3%), Kaizen (78,3%), Kanban (69,6%) y PDCA (69,6%). Por otra parte, las herramientas más usadas entre 5 a 10 años fueron: 5S (100%), Poka-yoke (100%), Kaizen (87,5%), JIT (87,5%), Standardized work (75%), finalmente las herramientas estrellas que fueron adoptadas por más de 10 años de implementación fueron: 5S (100%), Kaizen (92,3%), PDCA (76,9%) y TPM (69,2%)

< 5 years of implementation		5 - 10 years of implementation		> 10 years of implementation	
Tools	%	Tools	%	Tools	%
Standardized work	82.6%	5S	100.0%	5S	100.0%
5S	78.3%	Poka-yoke	100.0%	Kaizen	92.3%
Kaizen	78.3%	Kaizen	87.5%	PDCA	76.9%
Kanban	69.6%	JIT	87.5%	TPM	69.2%
PDCA	69.6%	Standardized work	75.0%	JIT	53.8%
Poka-yoke	60.9%	Kanban	62.5%	TQM	53.8%
One piece flow	47.8%	PDCA	62.5%	Poka-yoke	46.2%
TPM	47.8%	Andon	50.0%	Kanban	46.2%
JIT	43.5%	TPM	50.0%	Standardized work	46.2%
Cellular layout	39.1%	Cellular layout	37.5%	Heijunka	30.8%
VSM	39.1%	SMED	37.5%	One piece flow	30.8%
Heijunka	34.8%	One piece flow	37.5%	VSM	30.8%
TQM	34.8%	VSM	37.5%	Cellular layout	23.1%
Six Sigma	30.4%	TQM	37.5%	Jidoka	23.1%
SMED	21.7%	Six Sigma	25.0%	Six Sigma	23.1%
Andon	21.7%	Heijunka	12.5%	Andon	23.1%
Jidoka	17.4%	Jidoka	12.5%	Group Technology	7.7%
Group Technology	8.7%	Group Technology	0.0%	SMED	7.7%
	n = 23		n = 8		n = 13

Tabla 9: Ranking de herramientas según el número de años de implementación de Lean Manufacturing

Fuente: (Wong, Wong, & Ali, 2009)

Los encuestados fueron evaluados en cuanto a los obstáculos de la implementación de Lean Manufacturing se refiere y según como indica la *Figura 6* el 40,91% de ellos reincidieron al cambio debido a las costumbres y viejas formas de trabajo, el 36,36% fue por resistencia de los empleados, el 31,82% fue por restricción presupuestaria, 31,82% debido a la cultura organizacional y el 25% por la falta de conocimientos técnicos para ponerlo en práctica. En último lugar fue la falta de apoyo de la alta dirección (4,55%).

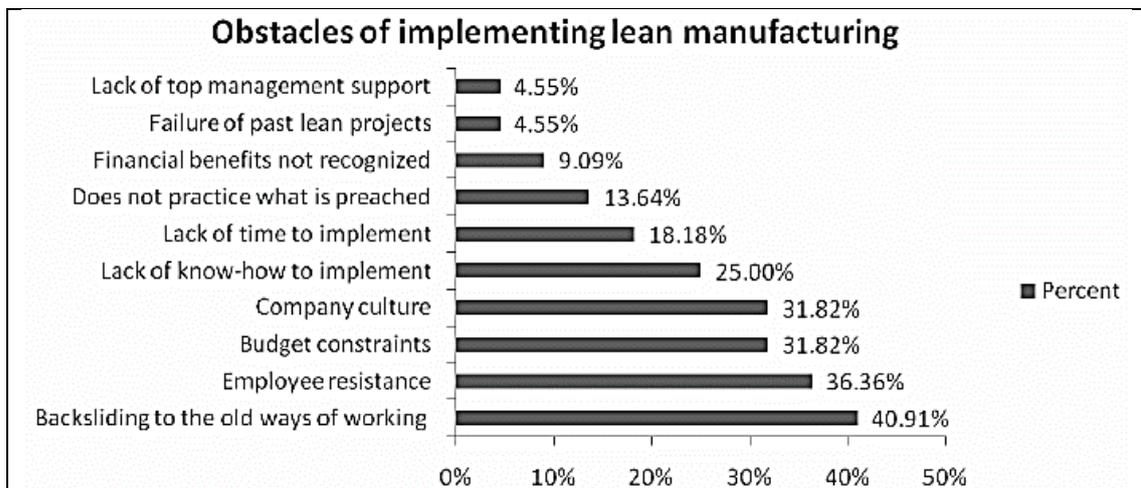


Figura 6: Obstáculos de la implementación de Lean Manufacturing

Fuente: (Wong, Wong, & Ali, 2009)

En el artículo científico: “*Re-engineering Assembly line with Lean Techniques*” (Nguyen & Do, 2016) se presentó un caso de estudio a una línea de montaje electrónico.

La metodología que se utilizó en este estudio fue mediante la ejecución de cada uno de los pasos presentados en la *Figura 7* para transformar el modelo de fabricación actual a un modelo con enfoque Lean Manufacturing, (re-ingeniería de la línea de montaje). (Nguyen & Do, 2016, pág. 591)

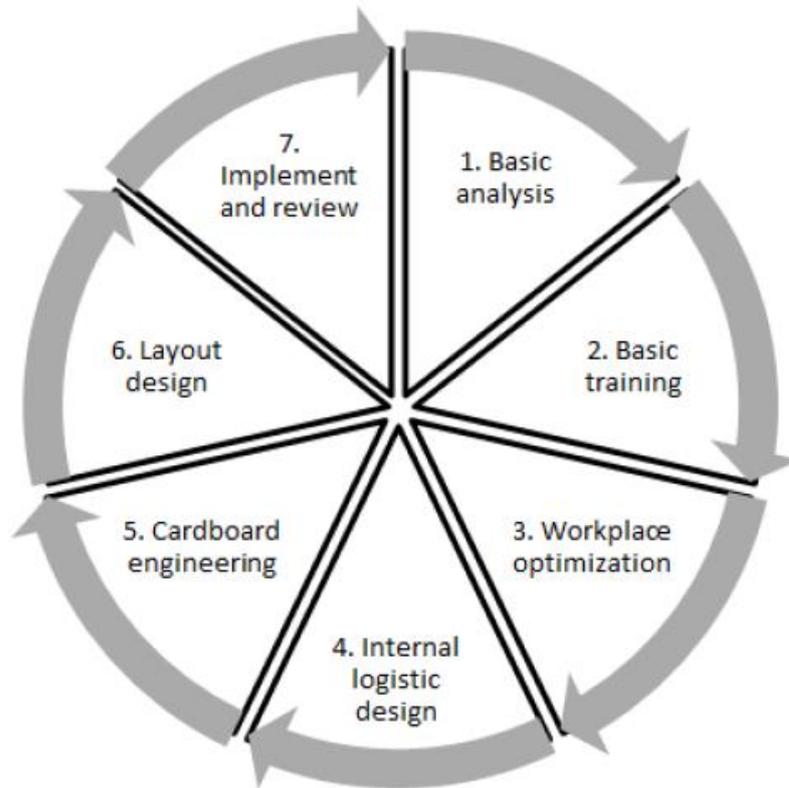


Figura 7: Pasos sugeridos para la aplicación de la metodología
Fuente: (Nguyen & Do, 2016)

En el artículo científico: *“Implementation of Lean Manufacturing through Supplier Kaizen Framework - A Case Study”* (Rusli, Jaffar, Suzilawati , & Mohd , 2014) se presentó un caso de estudio de una empresa llamada UA company, situada en Shah Alam, Malasia y consta de tres plantas que son planta principal, planta de estampado y de la planta de plástico. Rusli et al. (2014, pág. 2222)

La metodología que se utilizó en este estudio fue mediante la aplicación del Supplier Kaizen framework con sus debidos pasos (véase *Figura 8* y *Figura 9*) que aporta al mejoramiento de las actividades Lean. Rusli et al. (2014, pág. 2222)

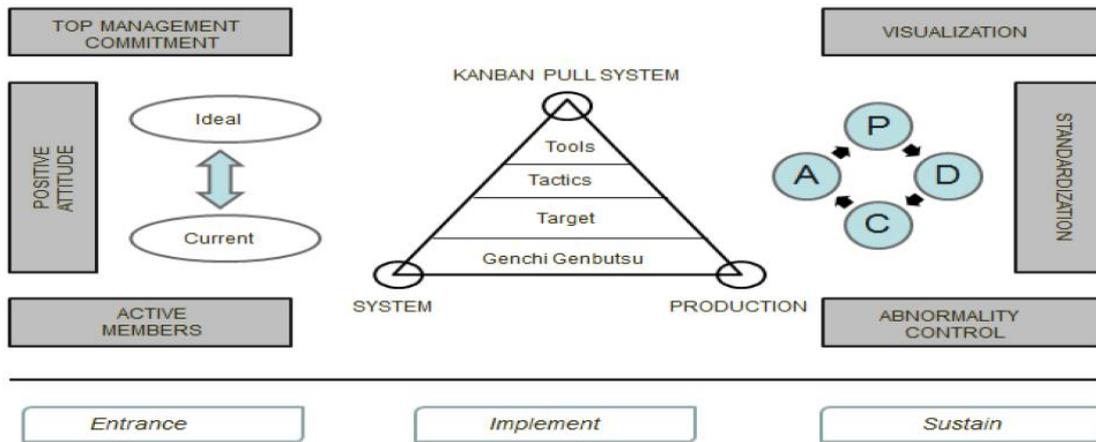


Figura 8: Supplier Kaizen framework
Fuente: (Rusli, Jaffar, Suzilawati, & Mohd, 2014)

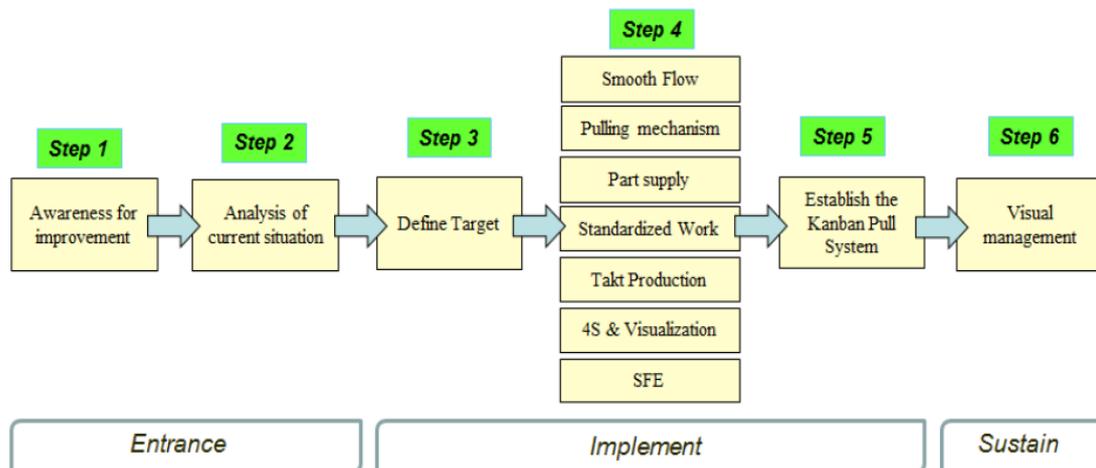


Figura 9: Pasos del Supplier Kaizen
Fuente: (Rusli, Jaffar, Suzilawati, & Mohd, 2014)

En el artículo científico: “*Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation*” (Azian, Rahman, Mohd, & Mohamed, 2013) se presentó un caso de estudio en una empresa de manufactura en Malasia seleccionada al azar pero que haya implementado el Lean Manufacturing con prácticas Kanban. Azian et al. (2013, pág. 177)

La metodología que se optó fue la recolección de datos mediante observación y entrevistas estructuradas con el objetivo de tener conocimiento en cuanto a las operaciones se refiere y su sistema Kanban. Azian et al. (2013, pág. 177)

2.3. TEORÍA DE RESTRICCIONES

En el trabajo de investigación: “*Simplified Drum-Buffer-Rope: A Whole System Approach to High Velocity Manufacturing*” (Schrageheim & Dettmer, 2000) se trató sobre la diferencia entre el DBR (Drum-Buffer-Rope) tradicional con el S-DBR (Simplified-DBR) que se presentan a continuación:

Respecto al nivel de rendimiento, el DBR tradicional es capaz de conseguir más rendimiento del CCR (Capacity Constrained Resource) en ciertos períodos de máxima demanda, debido a la programación detallada de CCR. (Schrageheim & Dettmer, 2000, pág. 8)

En la satisfacción del cliente el S-DBR es dominante respecto al DBR tradicional porque su factor restricción viene dada por la demanda la cual debe centrarse para no descuidarla. (Schrageheim & Dettmer, 2000, pág. 8)

Respecto a la atención de la demanda, el DBR tradicional suele centrarse en los recursos internos mientras que el S-DBR se enfoca mucho en la demanda del mercado.

En cuanto al tiempo de espera se refiere, tener una memoria intermedia, en lugar de tres, permite a los S-DBR lograr los más cortos plazos de entrega. La acumulación de la protección es siempre más eficaz que la difusión de la misma. (Schrageheim & Dettmer, 2000, pág. 8)

El apoyo de paquetes de tecnología de la información (IT) se adapta mejor con S-DBR porque es mucho más fácil de planificar y controlar con sistemas de planificación de necesidades comunes. De hecho, los paquetes de software especializados DBR no son realmente necesarios, ya que los sistemas de planificación de necesidades se pueden ajustar para apoyar S-DBR. Esto puede ser un beneficio real para las empresas que ya cuentan con sistemas MRP, pero podría ser incapaz o no invertir en software especializado DBR. (Schrageheim & Dettmer, 2000, pág. 8)

La facilidad de aplicación. S-DBR es sustancialmente más fácil de implementar, y la mayoría de los beneficios, al hacerlo, se acumulan más rápidamente.

En el artículo científico: “*Theory of constraints: a theory for operations management*” (Gupta & Boyd, 2008) se utilizó como metodología el uso de una clasificación comúnmente aceptada de las decisiones de operaciones (procesos, calidad, inventario y capacidad), puntos de vista tradicionales, y se acerca a las decisiones de operaciones a las inherentes a la Teoría de Restricciones y se comparan. (Gupta & Boyd, 2008, pág. 991)

Es importante mencionar que TOC guarda gran relación con la gestión de operaciones y respecto a toda la empresa, considerada una teoría unificada y para es necesario que se realice lo siguiente: (Gupta & Boyd, 2008, pág. 1007)

- Investigar las ventajas y desventajas del TOC
- Impacto que tiene respecto a otras áreas funcionales dentro de la empresa ya sean positivas o negativas

En el artículo científico: “*Application of the theory of constraints to a bottleneck operation in a manufacturing plant*” (Pegels & Watrous, 2005) se analizó una compañía manufacturera de luces para camiones o remolques de carga pesada como luces de cabezales, luces traseras, luces interiores, entre otros. (Pegels & Watrous, 2005, pág. 303)

La metodología que se utilizó en este estudio fue la detección del cuello de botella originado en las operaciones de cambio de molde en los procesos de fabricación de inyección de plástico para componentes de los sistemas de iluminación de camiones de carga pesada. (Pegels & Watrous, 2005, pág. 302)

En la *Tabla 10* se presenta los tiempos de preparación y producción para la fabricación de una luz típica. (Pegels & Watrous, 2005, pág. 304)

Production process	Cycle time per unit (seconds)	Set-up time (minutes)	Processing time (minutes)	Teardown time (minutes)
Injection mold lens	23	165	330	65
Injection mold housing	23	175	360	70
Vacuum metalize housings	28	65	480	285
Assembly line production	28	115	450	75

Tabla 10: *Tiempos de procesos y secuencias de producción de una luz típica*
Fuente: (Pegels & Watrous, 2005)

El cuello de botella se genera en el momento en que algunos componentes requieren ser moldeados por una sola máquina de moldeo por inyección. (Pegels & Watrous, 2005, pág. 304)

2.4. LEAN MANUFACTURING Y TEORÍA DE RESTRICCIONES

En el trabajo de investigación: “*Applying Theory of Constraints principles and Lean Thinking at the Marine Corps Maintenance Center*” (Srinivasan, Jones, & Miller, 2004) se presentó un caso de estudio en el Centro de Mantenimiento de la Base Logística de la Infantería Marina situada en Albania y es responsable de la regeneración y reconstitución de los equipos requeridos por el cuerpo de marina de preparación para el combate. Srinivasan et al. (2004, pág. 135)

En la *Figura 10* se presenta el modelo tradicional DBR donde se observa que el ritmo de producción lo marca el recurso de capacidad limitada (800 unidades al día), porque su nivel de producción es menor que los demás procesos, donde el Buffer está en frente de la restricción que tiene una cuerda

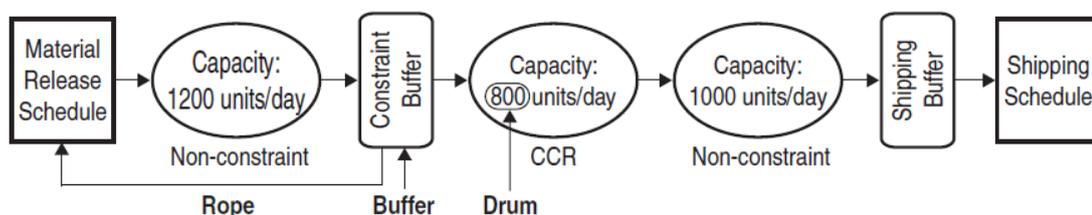


Figura 10: *Modelo Drum-Buffer-Rope tradicional*
Fuente: (Srinivasan, Jones, & Miller, 2004)

En cambio, la *Figura 11* comprende el modelo del S-DBR donde la restricción viene dada directamente la demanda y frente a ella existe un buffer denominado buffer de envío.

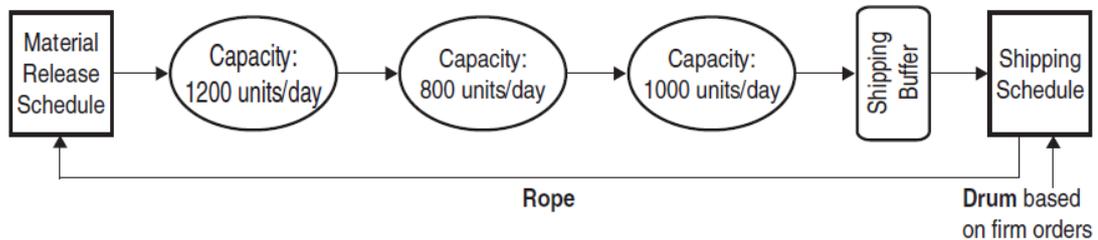


Figura 11: Modelo Drum-Buffer-Rope simplificado
Fuente: (Srinivasan, Jones, & Miller, 2004)

2.5. DINÁMICA DE SISTEMAS

En el artículo científico: “*System dynamics approach to analysing the cost factors effects on cost of quality*” (Kiani, Shirouyehzad, Khoshsaligheh Bafti, & Fouladgar, 2009) presentó un estudio de caso de una empresa que produce a pequeña escala, se llama Sabet Print Company. Kiani et al. (2009, pág. 692)

La metodología que se aplicó a este estudio fue el diseño de un diagrama causal para presentar la estructura del modelo.

Las relaciones de los factores de costo, la satisfacción del cliente, y el nivel de calidad del producto se muestran en la *Figura 12*. Los costes de calidad afectaban directamente el nivel de calidad de los productos y quejas de los clientes, y estos dos factores tuvieron efectos sobre la satisfacción del cliente. Los costes de calidad tenían también un efecto directo en el precio de la unidad de producción y el efecto indirecto sobre la rentabilidad. La *Figura 14* representa los detalles de los diferentes tipos de COQ. Kiani et al. (2009, pág. 690)

Como se muestra en la *Figura 13*, los diferentes tipos de costos afectaban de forma dinámica otros factores de costos. Por ejemplo, los costos de prevención y evaluación afectaban a los costes internos y externos. Kiani et al. (2009, pág. 692)

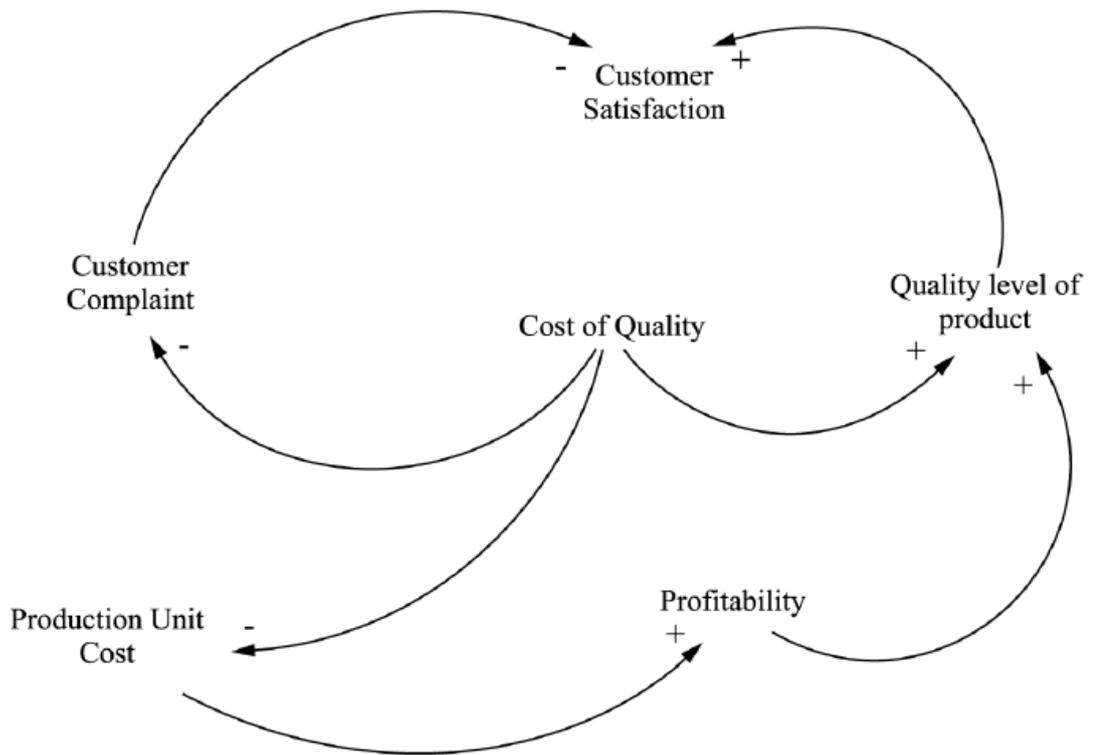


Figura 12: Diagrama causal de costo de calidad
Fuente: (Kiani, Shirouyehzad, Khoshsaligheh Bafti, & Fouladgar, 2009)

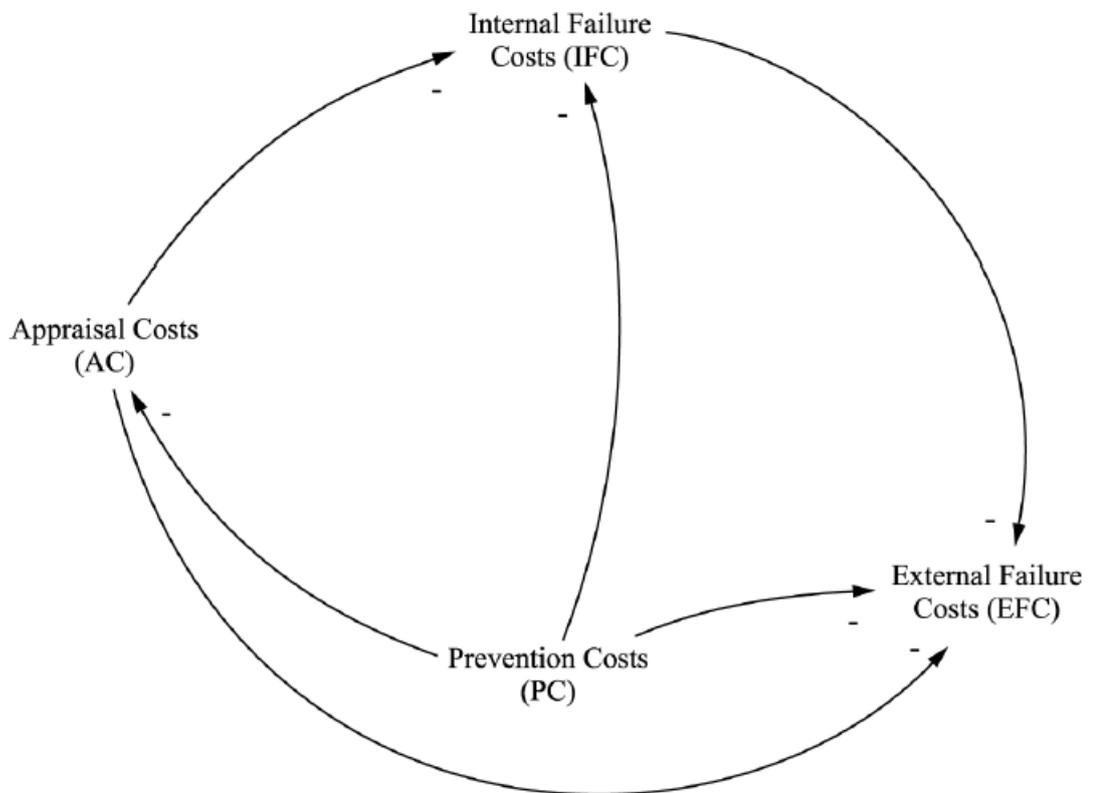


Figura 13: Diagrama causal de los factores de costo
Fuente: (Kiani, Shirouyehzad, Khoshsaligheh Bafti, & Fouladgar, 2009)

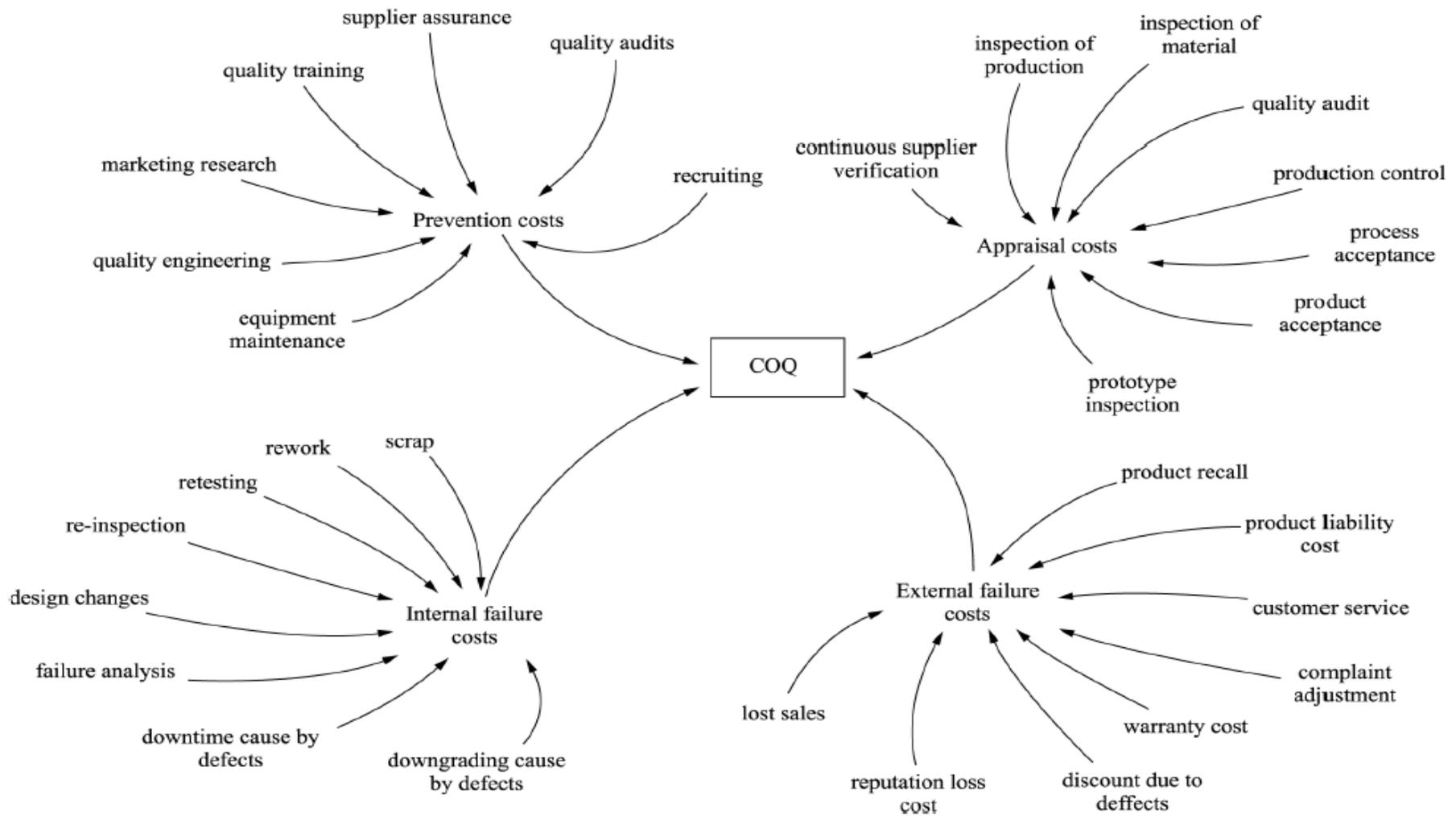


Figura 14: Diagrama causal de los detalles de factores de costo
Fuente: (Kiani, Shirouyehzad, Khoshsaligheh Bafti, & Fouladgar, 2009)

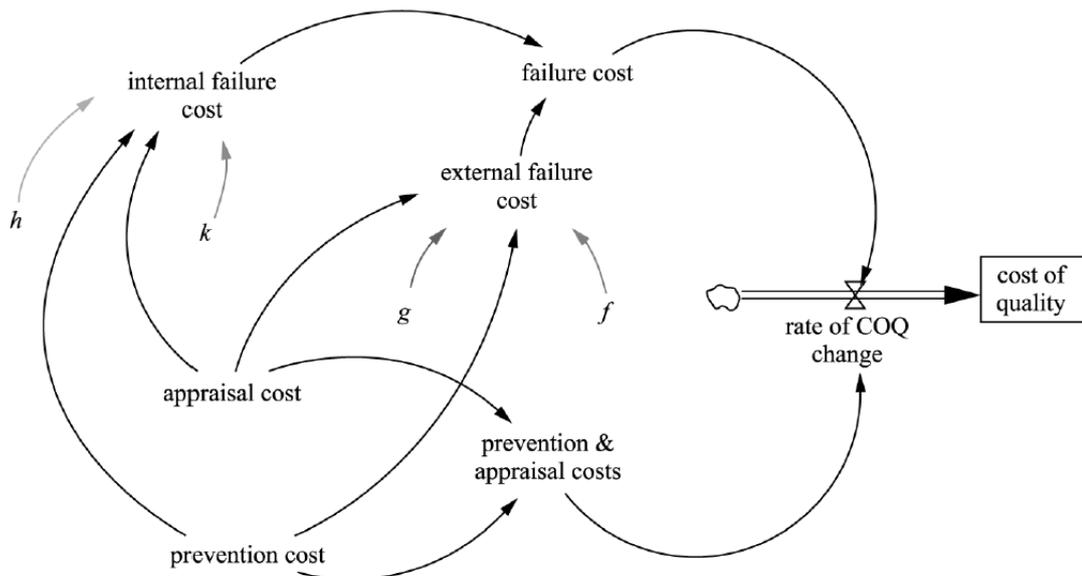


Figura 15: Diagrama causal en el software Vensim
Fuente: (Kiani, Shirouyehzad, Khoshsaligheh Bafti, & Fouladgar, 2009)

En la *Figura 15* se presenta la estructura del componente de costos. Los modelos de dinámica de sistemas se pueden obtener con variedad de pruebas que incluyen pruebas de la estructura del modelo, el comportamiento del modelo, e implicaciones políticas del modelo. La confianza en un modelo de dinámica de sistemas se acumula gradualmente a medida en que se le realizan más pruebas en el modelo y nuevos puntos de correspondencia entre el modelo y la realidad empírica se identifican. (Sterman, 2000, pág. 692)

En este modelo, aumentando el valor de entrada en un parámetro, la disminución de valor de salida en otro parámetro podría ser observado, como se muestra en la *Figura 16*, el aumento del valor de entrada hizo que el valor de salida disminuya en los cuatro parámetros f, g, k, y h. Kiani et al. (2009, págs. 694-695)

- Factor f: el eje X se relacionó con los costes de prevención y el eje Y con los costes de fallos externos. Kiani et al. (2009, págs. 694-695)
- Factor g: el eje X se relacionó con la evaluación y el eje Y con los costes de fallos externos. Kiani et al. (2009, págs. 694-695)

- Factor k: el eje X se relacionó con los costes de prevención y el eje Y con los costes de fallos internos. Kiani et al. (2009, págs. 694-695)
- Factor h: el eje X se relacionó con la evaluación y el eje Y con los costes de fallos internos. Kiani et al. (2009, págs. 694-695)

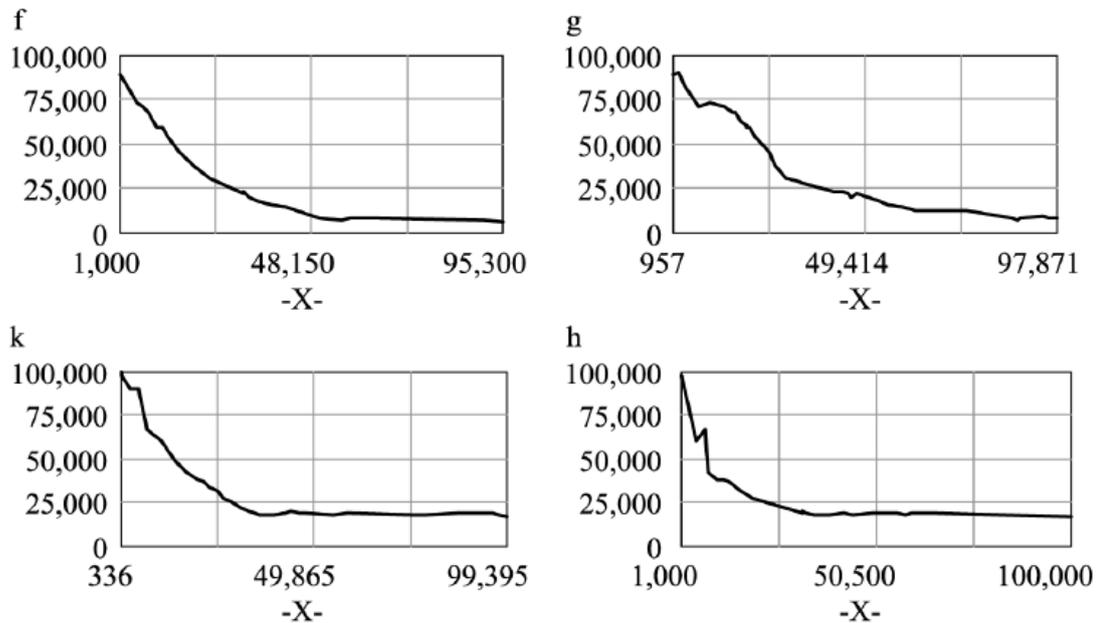


Figura 16: Relación entre los costos de conformidad y los de inconformidad
Fuente: (Kiani, Shirouyehzad, Khoshsaligheh Bafti, & Fouladgar, 2009)

Como se muestra en la *Figura 17*, si la organización no pagaba ningún costo o pagaba un poco sobre los costos de prevención y evaluación, el costo total de calidad sería muy alto. Es obvio que no pagar estos costos no es lógico que tendría gran efecto en el precio total de la calidad a través de los costes de fallos, por el contrario, el aumento de los costos de prevención y evaluación disminuiría la COQ total. Tal como se muestra en las *Figura 18 (a)* y *Figura 18 (b)*, los costes de prevención tuvieron el mayor efecto en COQ total que los costos de evaluación. Por lo tanto, la satisfacción del cliente y la rentabilidad se podrían conseguir a través de esta metodología. Kiani et al. (2009, pág. 695)

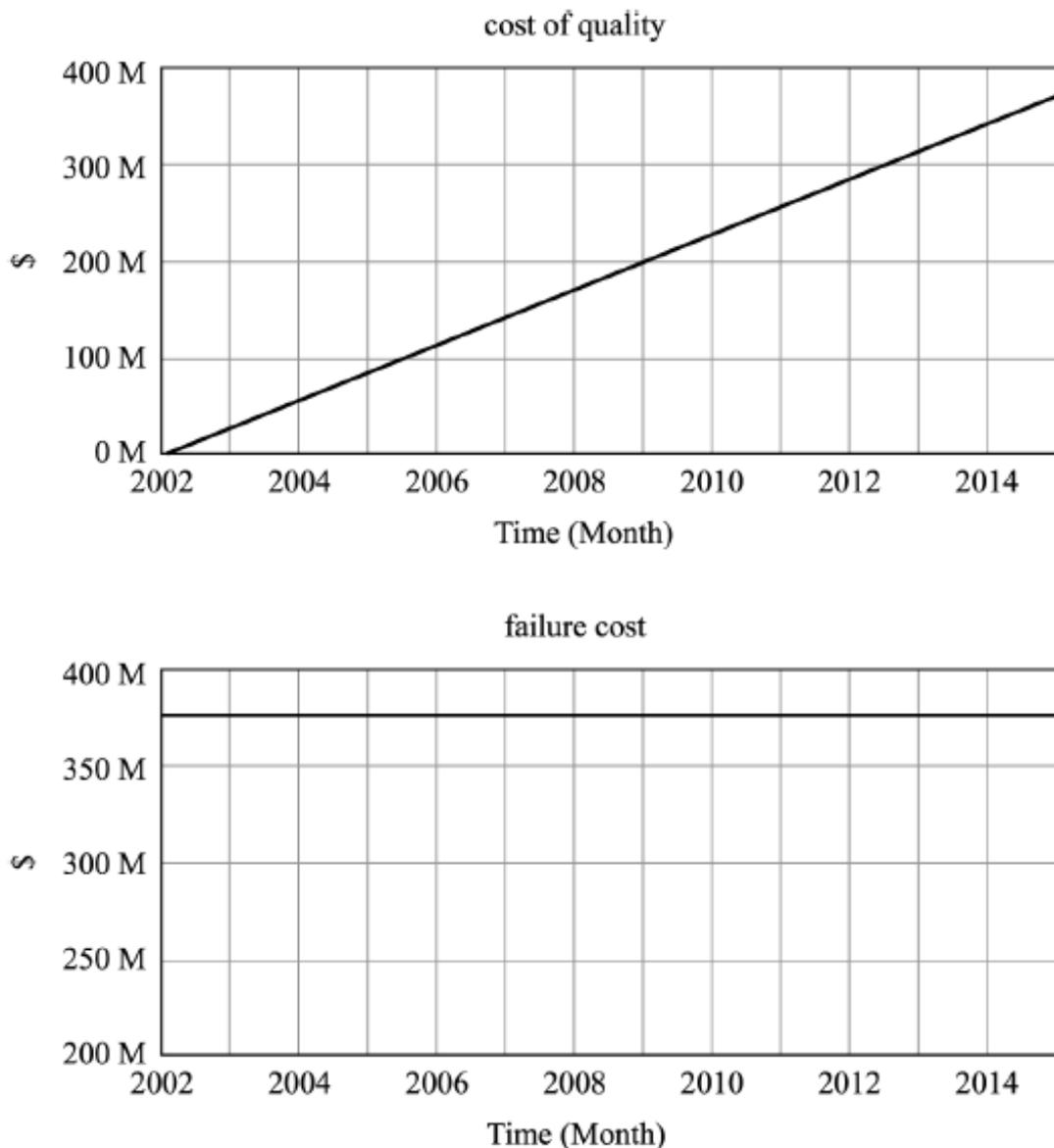
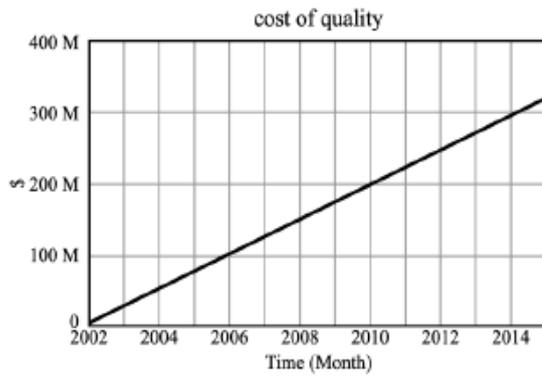
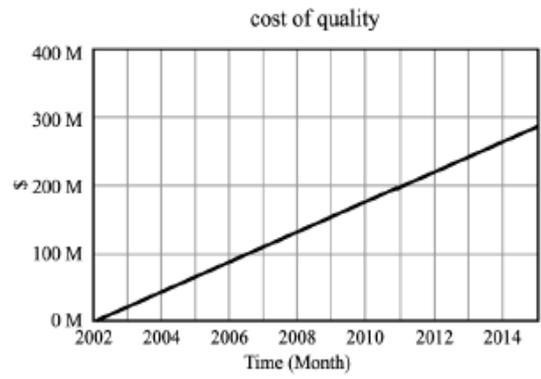


Figura 17: Diagrama COQ – Cero costos de prevención y de evaluación
Fuente: (Kiani, Shirouyehzad, Khoshsaligheh Bafti, & Fouladgar, 2009)

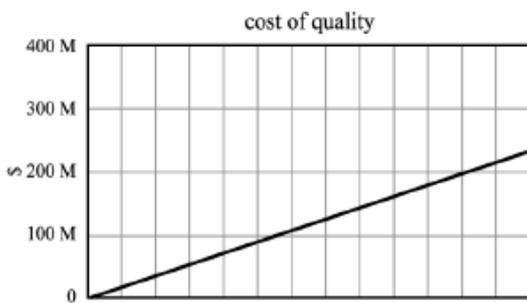
De acuerdo con la *Figura 18 (c)*, tanto los costos de prevención y evaluación afectaban el costo total de la calidad simultáneamente más que el caso en que uno solo aumentaba. Si los costos de prevención aumentaran gradualmente, pero los costos de evaluación no cambiaban (los costos de evaluación eran iguales a \$10.000), entonces los costos de fallos especialmente externos disminuirían. Kiani et al. (2009, págs. 694-695)



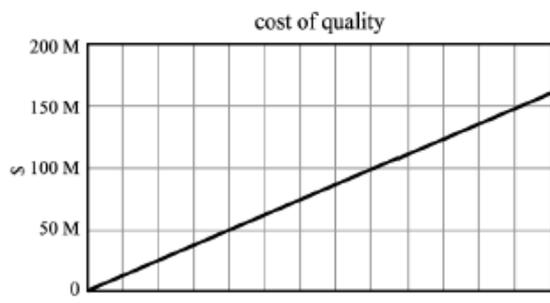
(a) Appraisal Cost = 10,000 & Prevention Cost = 0



(b) Appraisal Cost = 0 & Prevention Cost = 10,000



(c) Appraisal Costs = 10,000 & Prevention Costs = 10,000



(d) Appraisal Costs = 10,000 & Prevention Costs = 50,000

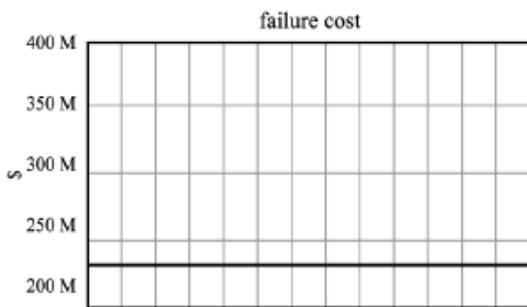


Figura 18: Los efectos de diferentes costos de calidad de prevención y evaluación
Fuente: (Kiani, Shirouyehzad, Khoshsaligheh Bafti, & Fouladgar, 2009)

2.6. TEORÍA DE RESTRICCIONES Y DINÁMICA DE SISTEMAS

En el artículo científico: “*A System Dynamics View of the Theory of Constraints*” (Wixson & Mills) muestra la aplicación de Teoría de Restricciones in dinámica de sistemas.

Un modelo Stella del sistema de producción sencilla aparecería como el modelo de la *Figura 19*. El tiempo para procesar partes a través de cada transportador se basa en una jornada de 8 horas. Por lo tanto, puesto que A puede procesar 11 partes por día, el tiempo de proceso es de 8 horas / 11 partes, o 0.72 horas para una parte a ser procesada. Esto establece el tiempo de tránsito para el transportador A en 0.72 horas, o unos 44 minutos. El software Stella redondea fracciones, por lo que, las unidades de tiempo para este modelo se manejan mejor en cuestión de minutos. Del mismo modo, puede procesar B 9 partes por día, o un tiempo de tránsito de 53 minutos, C es de 96 minutos, D es de 60 minutos, y E es de 32 minutos. (Wixson & Mills, pág. 7)

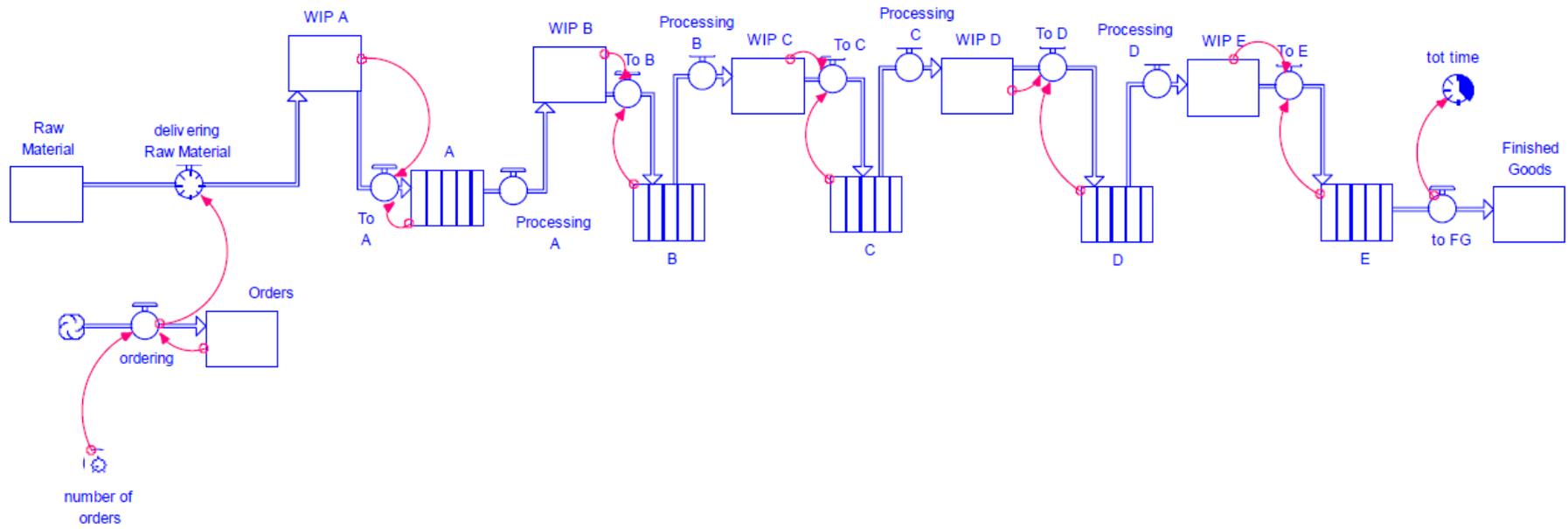


Figura 19: Un modelo de un Sistema de Producción Simple
Fuente: (Wixson & Mills)

La ejecución de esta simulación se obtiene cierta información interesante sobre el modelo. La *Figura 20* muestra una salida gráfica del tiempo que se necesita para producir 5 unidades. La *Figura 21* muestra que se necesita 1.275 minutos, o 21.25 horas para alcanzar los productos terminados total igual al número de órdenes si el número de órdenes se ponen a 5. (Wixson & Mills, pág. 7)

La *Figura 21* es un gráfico del tiempo que se necesita para producir 5 unidades de productos terminados. (Wixson & Mills, pág. 8)

El concepto tambor-buffer-cuerda (DBR) de TOC afirma que la retroalimentación se proporciona desde el recurso limitado críticamente (CCR) a la fuente de suministro de materia prima. Un margen de tiempo del material colocado entre la materia prima (RM) y la restricción protege de morir de hambre. Una cuerda estrangula la RM para mantener trabajo en curso (WIP) en los niveles mínimos de la RCC. El trabajo se completa en tiempos de flujo previsible. (Wixson & Mills, pág. 9)

Este concepto está representado en el modelo Stella muestra en la *Figura 22*. Nota un conector de captación representa la "cuerda" de C, la CCR, a WIP A. Esto tiene el efecto de limitar el flujo de los procesos antes de la C al mismo nivel de C. a continuación, se añade un tampón al proceso B, de manera que C está protegida contra el hambre, sin embargo, a y B no están produciendo más de C. un circuito de retroalimentación para pedidos indica al sistema cuántos más se necesitan para mantener las unidades de C muriendo de hambre. Parecería que esta lógica haría que el modelo tome más tiempo para producir las 5 unidades de producción. Sin embargo, en realidad, el proceso es más rápido. Ahora, en lugar de 1,275.5 minutos para producir 5 unidades de producción, sólo se necesita 910.25 minutos (*Figura 11*). (Wixson & Mills, pág. 9)

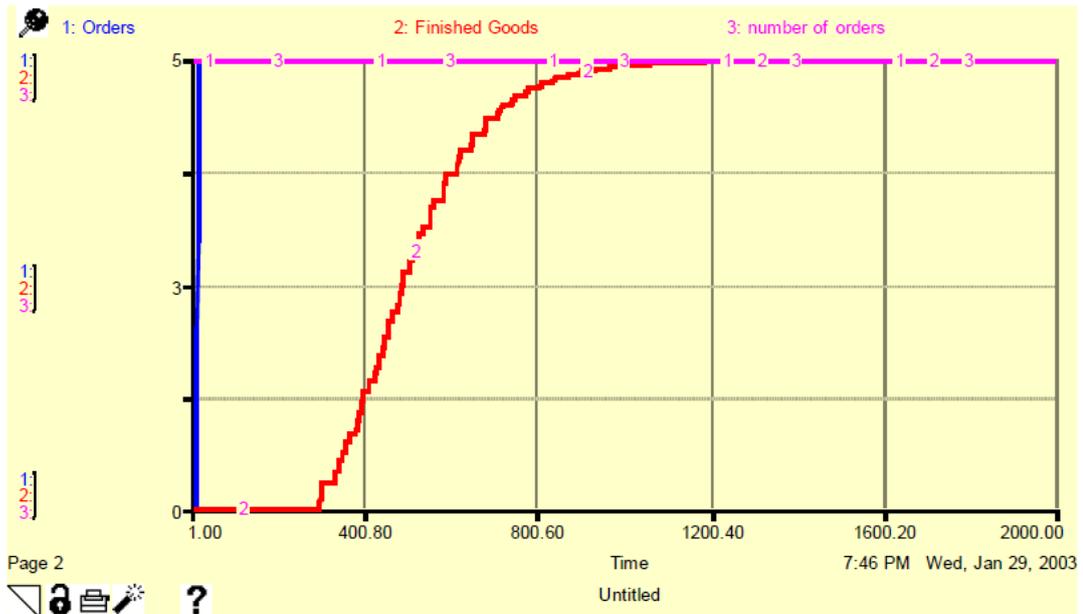


Figura 20: Tiempo para alcanzar bienes terminados de 5 igual a 1275 minutos, o 21,25 horas
Fuente: (Wixson & Mills)

Time	Finished Goods
1275.50	4.99
1275.75	4.99
1276.00	4.99
1276.25	4.99
1276.50	5.00
1276.75	5.00
1277.00	5.00
1277.25	5.00
1277.50	5.00
1277.75	5.00
1278.00	5.00
1278.25	5.00
1278.50	5.00
1278.75	5.00
1279.00	5.00

Figura 21: Gráfica de tiempo que produce 5 unidades de bienes terminados, Tiempo = 1,275 min
Fuente: (Wixson & Mills)

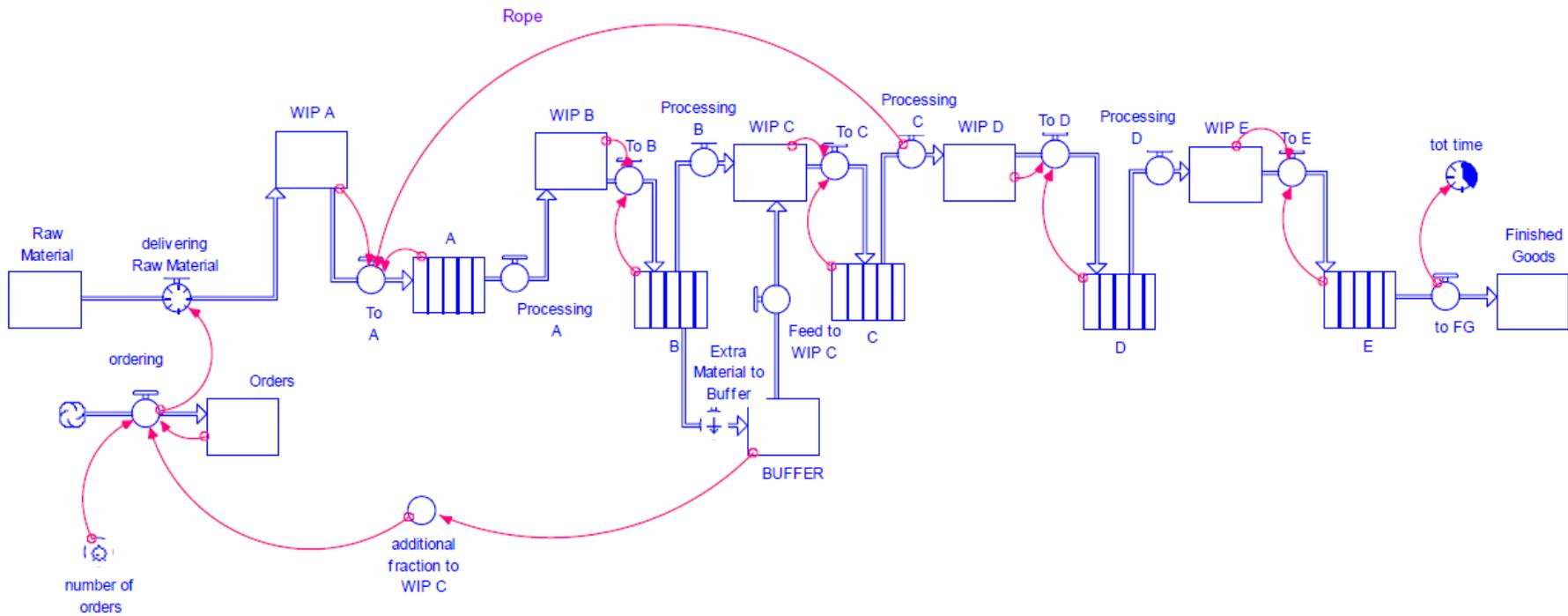


Figura 22: Modelo en Stella con retroalimentación y Buffer
Fuente: (Wixson & Mills)

Time	Finished Goods
909.00	4.96
909.25	4.96
909.50	4.96
909.75	4.96
910.00	4.98
910.25	5.00
910.50	5.00
910.75	5.00
911.00	5.00
911.25	5.00
911.50	5.00
911.75	5.00

Figura 23: Salida parcial del modelo en Stella sin Buffer
Fuente: (Wixson & Mills)

La *Figura 23* muestra la salida tabular del modelo. Esta muestra de productos terminados de 5 unidades que se efectuara en 910.25 minutos. Un gráfico de esta salida se muestra en la *Figura 24*. Nota la pendiente más pronunciada de la curva y la terminación temprana de los productos terminados. Además, tenga en cuenta que el número de pedidos se incrementa en 1 que representa el inventario adicional que se necesita para mantener el procedimiento C de morir de hambre. (Wixson & Mills, pág. 10)

En la *Figura 25*, *Figura 26*, *Figura 27* se presentan los resultados de patrones de flujo de material y en la *Figura 28*, *Figura 29*, *Figura 30* muestra los efectos de aplicar Teoría de Restricciones en los trabajos en procesos de inventarios.

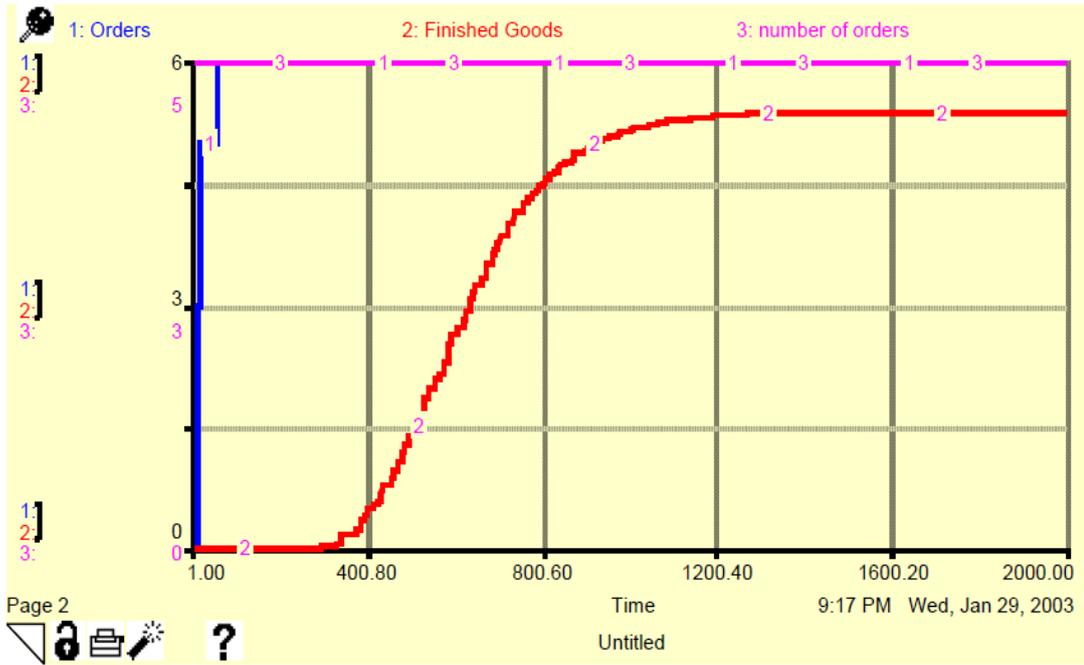
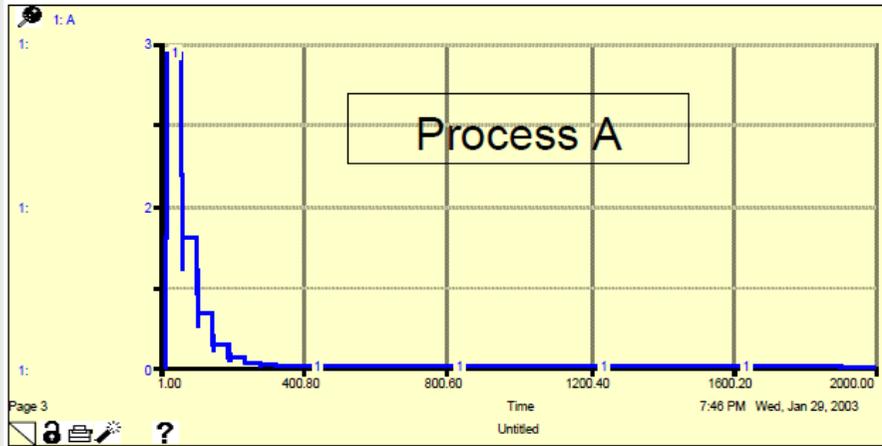
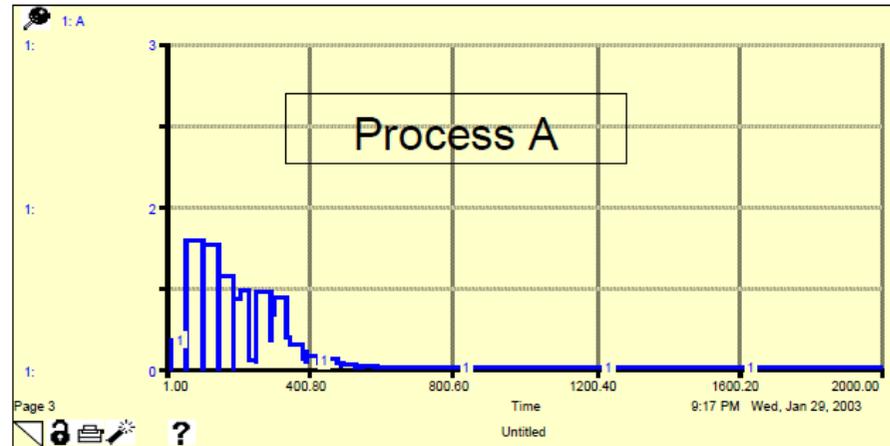


Figura 24: Gráfica de tiempo que produce 5 unidades de bienes terminados con TOC
Fuente: (Wixson & Mills)

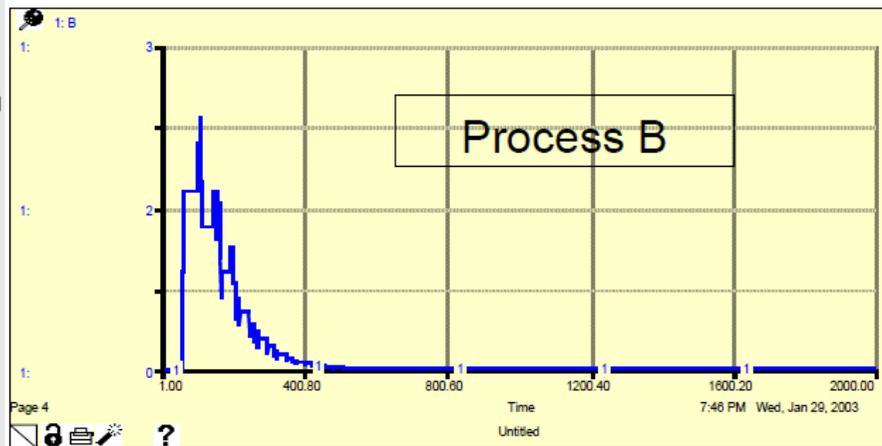
Without TOC Applied



With TOC Applied



Process B



Process B

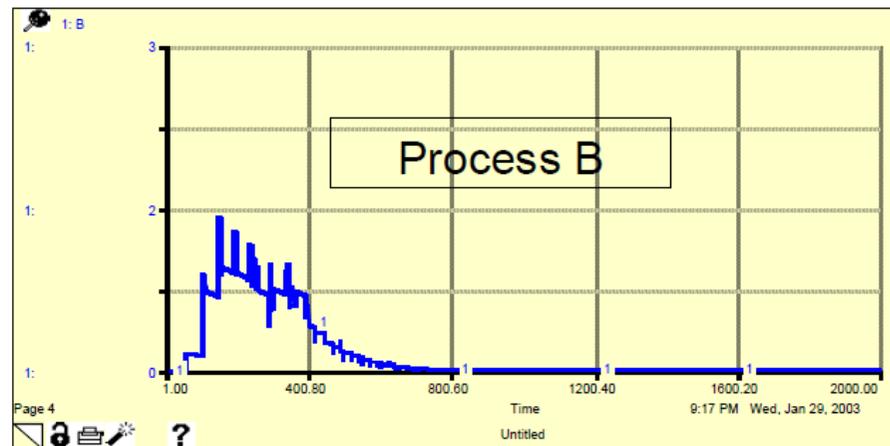
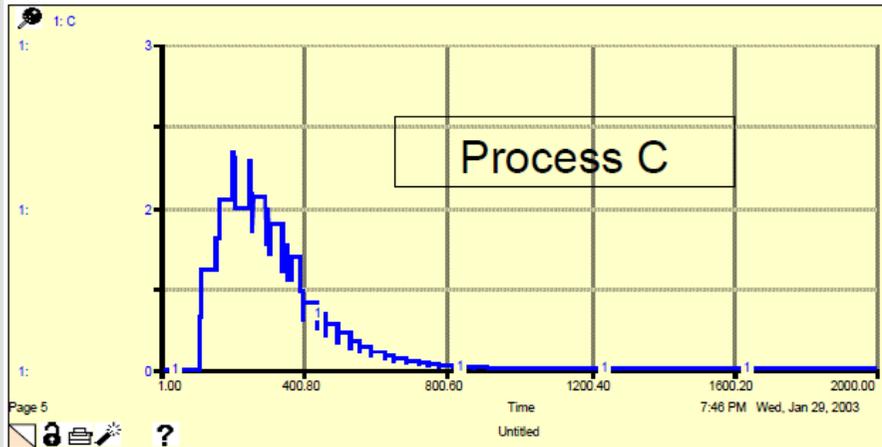
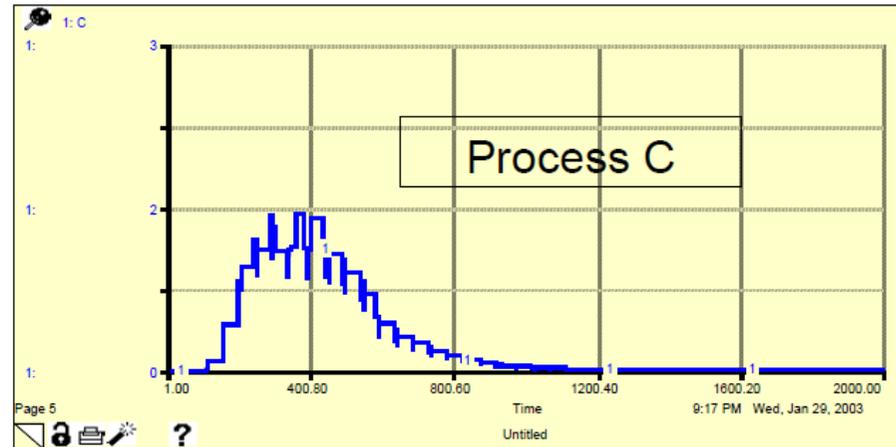


Figura 25: Resultados de gráficos de patrones de flujo de material (Parte 1/3)
Fuente: (Wixson & Mills)

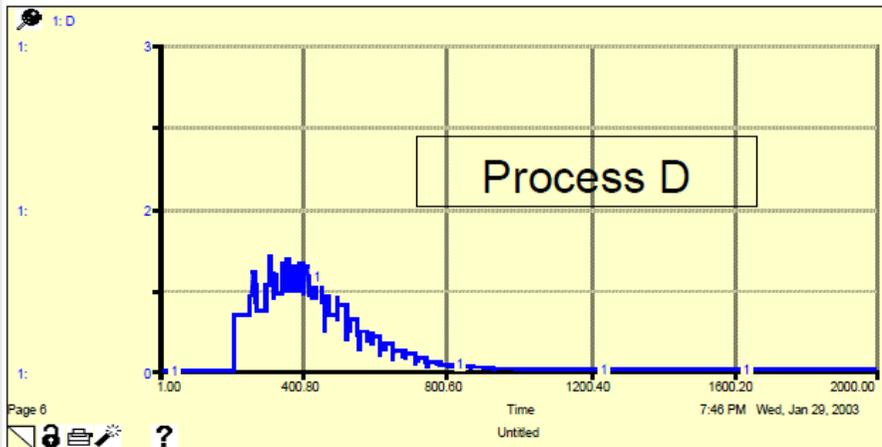
Without TOC Applied



With TOC Applied



Process D



Process D

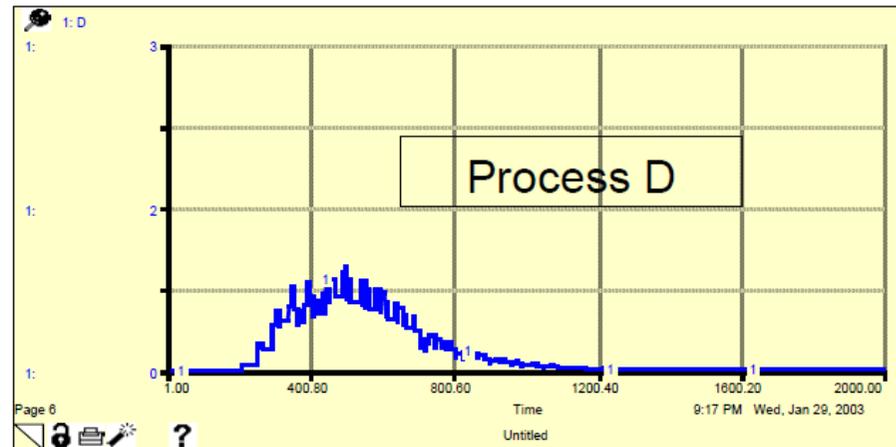
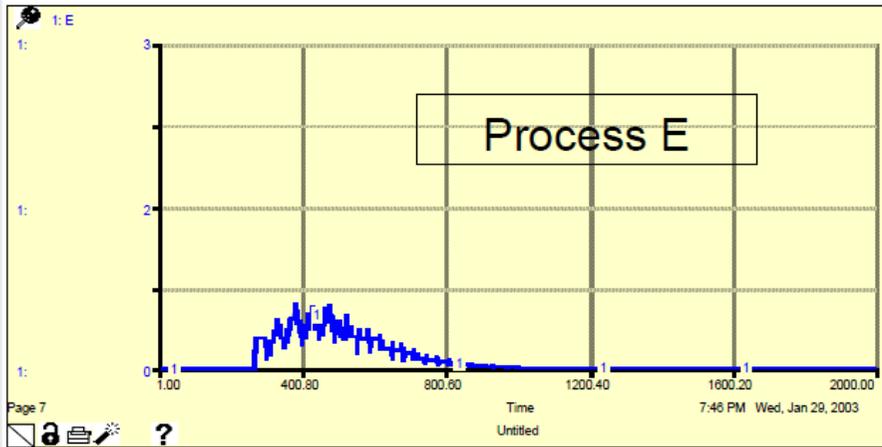


Figura 26: Resultados de gráficos de patrones de flujo de material (Parte 2/3)
Fuente: (Wixson & Mills)

Without TOC Applied



With TOC Applied

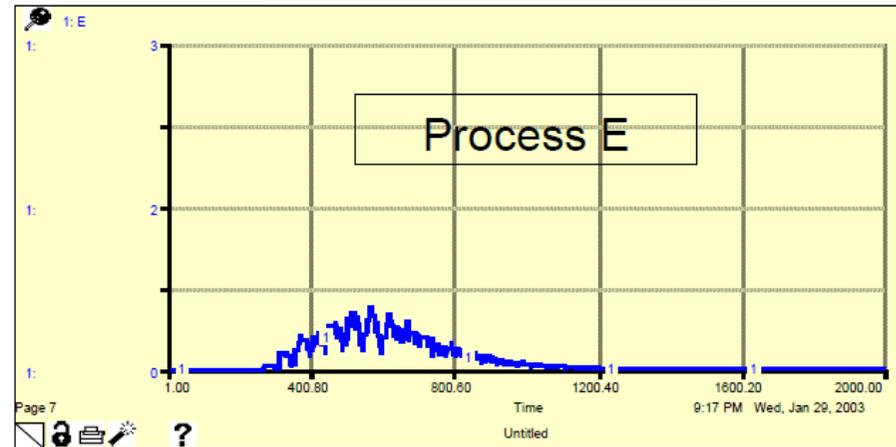
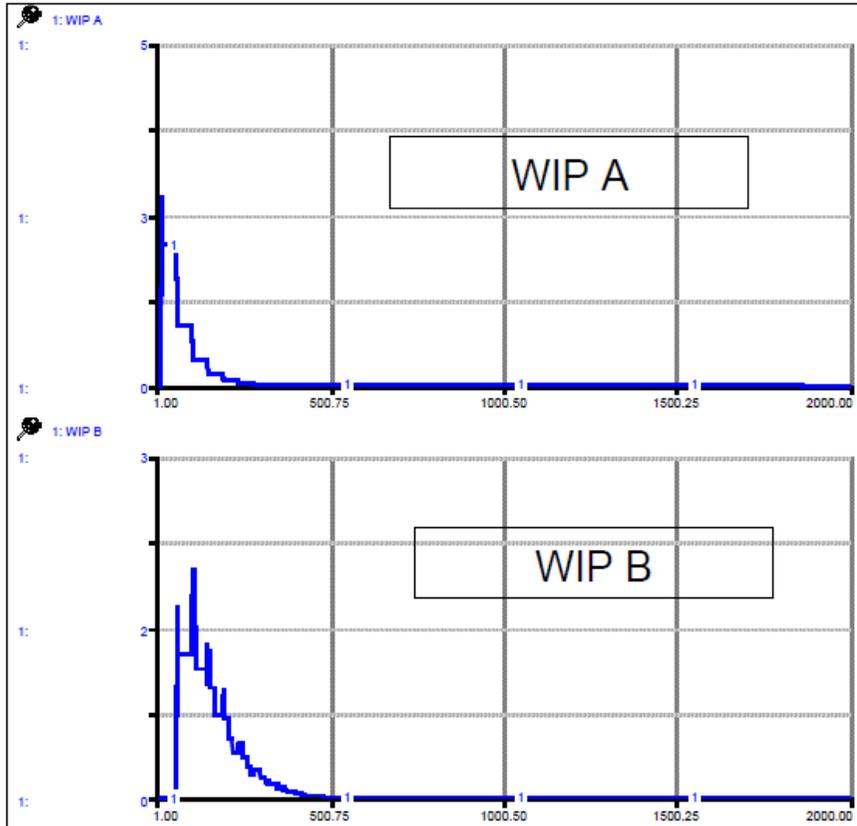


Figura 27: Resultados de gráficos de patrones de flujo de material (Parte 3/3)
Fuente: (Wixson & Mills)

Without TOC Applied



With TOC Applied

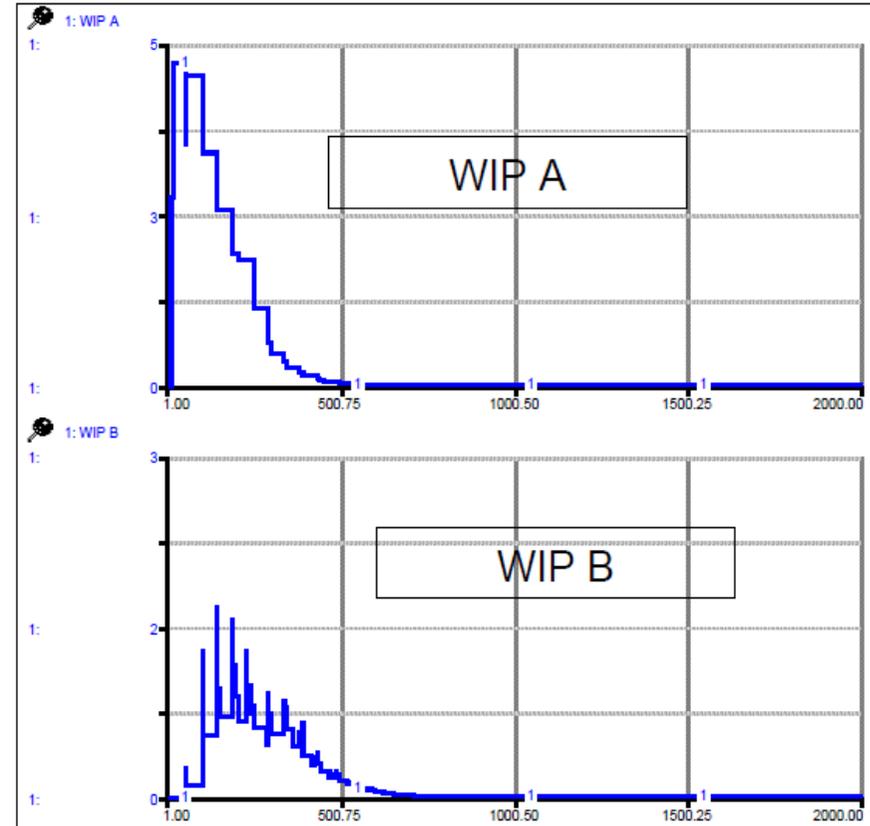


Figura 28: Efecto que TOC tiene en los trabajos en proceso de inventarios (Parte 1/3)
Fuente: (Wixson & Mills)

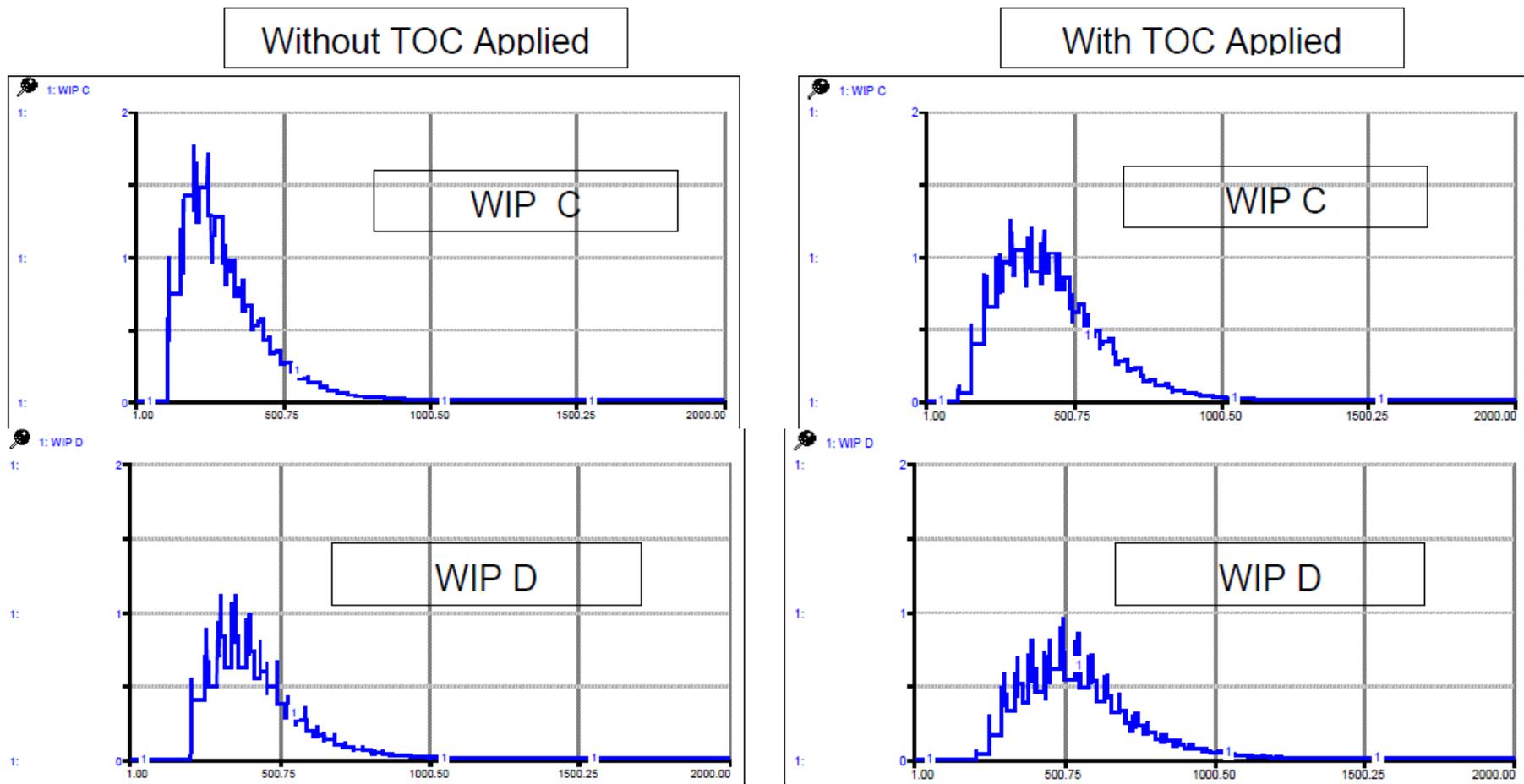


Figura 29: Efecto que TOC tiene en los trabajos en proceso de inventarios (Parte 2/3)
Fuente: (Wixson & Mills)

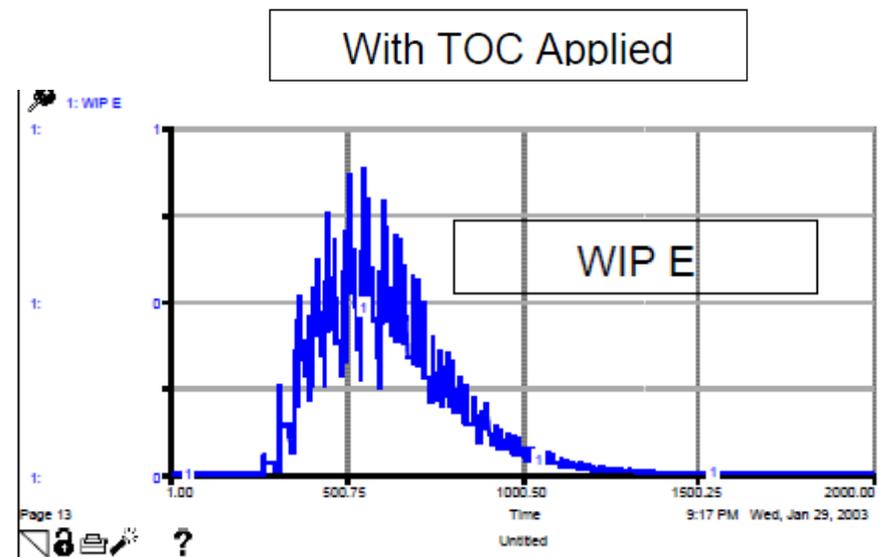
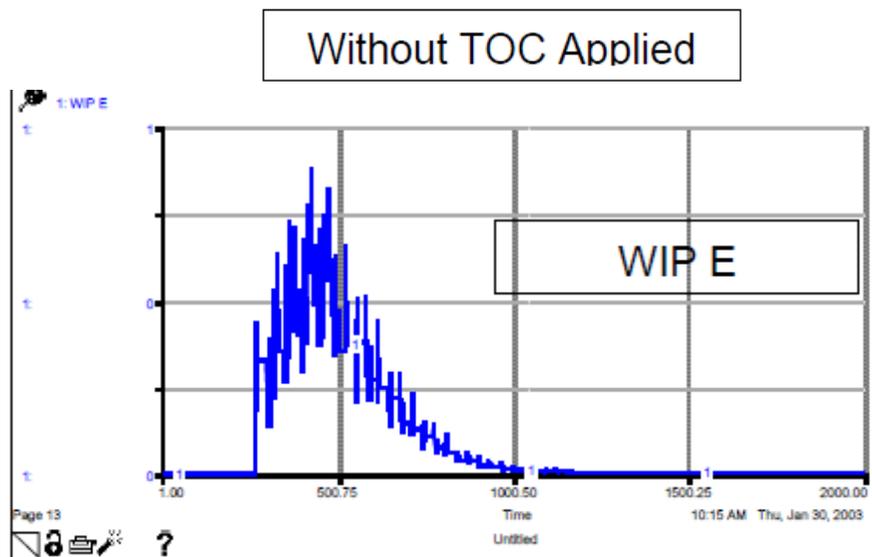


Figura 30: Efecto que TOC tiene en los trabajos en proceso de inventarios (Parte 3/3)
Fuente: (Wixson & Mills)

3. METODOLOGÍA

La metodología a seguir durante este trabajo de investigación se muestra en la

Figura 31

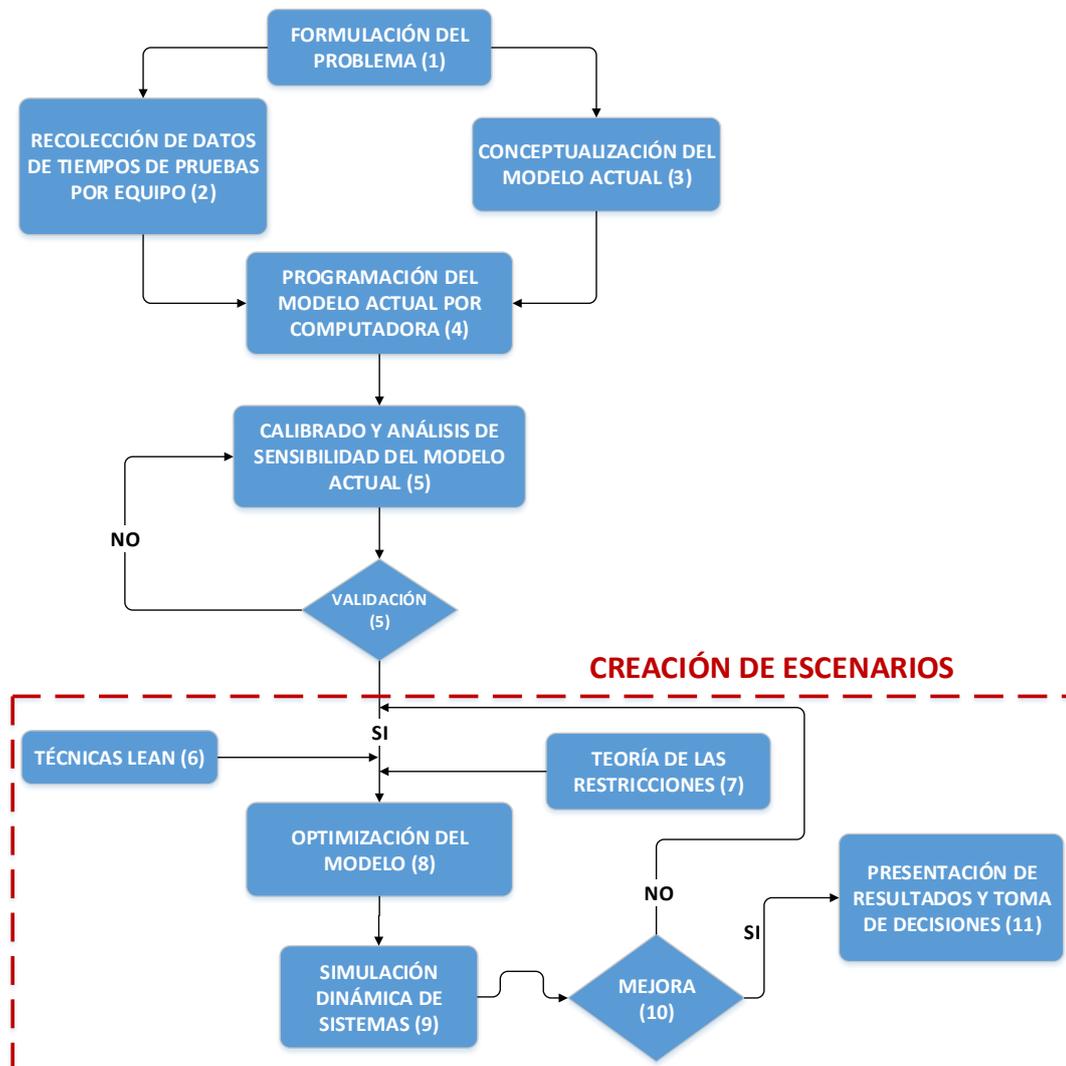


Figura 31: Proceso del marco metodológico e implementación que se utilizará en este trabajo de investigación

Fuente: Elaboración propia

3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Cada bobina que ingresa al laboratorio de control de calidad es inspeccionada por los correspondientes equipos de prueba, para que finalmente sea entregada a bodega en conjunto con otras para la respectiva venta al cliente. El problema surge en que no se revisan todas las bobinas que ingresan a este departamento, puesto que sólo se llegan a

analizar 16 bobinas en promedio de las 40 que son fabricadas al día en la planta de esmaltado.

Por lo tanto, se hace necesario desarrollar una propuesta de mejora de los procesos de pruebas de alambres en el laboratorio de control de calidad de bobinas, mediante el diseño de un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas, tomando como punto de partida el cálculo de los tiempos de las pruebas que cada equipo demora para cumplir su función en la inspección. Este estudio de tiempos ayudará significativamente en el modelado actual de los procesos y que mediante la aplicación de Teoría de Restricciones y técnicas Lean, se llevará a cabo la creación de escenarios que muestren mejoras de los mismos.

3.2. RECOLECCIÓN DE DATOS DE TIEMPOS DE PRUEBAS DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE CALIDAD

3.2.1. Nivel de investigación

El nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un objeto o fenómeno. Aquí se indicará si se trata de una investigación exploratoria, descriptiva o explicativa. En cualquiera de los casos es recomendable justificar el nivel adoptado. (Arias Odon, 1999)

Según el nivel, la investigación se clasifica en:

- Investigación Exploratoria
- Investigación Descriptiva
- Investigación Explicativa (Arias Odon, 1999)

La investigación Exploratoria es aquella que se efectúa sobre un tema u objeto poco conocido o estudiado, por lo que sus resultados constituyen una visión aproximada de dicho objeto. La Descriptiva se refiere a la caracterización de un hecho o fenómeno con el objetivo de establecer su estructura o comportamiento, y la Explicativa se

encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. (Arias Odon, 1999)

Para este tipo de trabajo el nivel de investigación a utilizar es la Descriptiva y la Explicativa.

3.2.2. Diseño de investigación

El diseño de investigación es la estrategia que adopta el investigador para responder al problema planteado. (Arias Odon, 1999)

Según el diseño a emplearse, la investigación se clasifica en:

- Investigación Documental
- Investigación de Campo
- Investigación Experimental (Arias Odon, 1999)

La Investigación Documental se basa en la obtención y análisis de datos provenientes de materiales impresos u otros tipos de documentos. La Investigación de Campo consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variable alguna, La Experimental es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos a determinadas condiciones o estímulos (variable independiente), para observar los efectos que se producen (variable dependiente). (Arias Odon, 1999)

Para este trabajo de investigación el diseño de investigación a utilizar es a nivel de Campo.

3.2.3. Selección de la muestra

La muestra es un subconjunto representativo de un universo o población. (Morles, 1994). Para este trabajo de investigación la muestra está dada por el tiempo que cada equipo de prueba de control demora para revisar el alambre esmaltado de una

bobina, incluyendo la preparación del material a priori, antes de someterlo a prueba en el equipo. Se toma el tiempo 112 veces por cada equipo de prueba.

3.2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos son las distintas formas o maneras de obtener la información. Son ejemplos de técnicas; la observación directa, la encuesta en sus dos modalidades (entrevista o cuestionario), el análisis documental, análisis de contenido, etc.

Los instrumentos son los medios materiales que se emplean para recoger almacenar la información. Ejemplo: fichas, formatos de cuestionario, guías de entrevista, lista de cotejo, grabadores, escalas de actitudes u opinión (tipo Likert), etc. (Arias Odon, 1999)

Para este tipo de investigación la técnica que se utiliza es por observación directa, y los instrumentos que se usan son el cronómetro y hojas de cálculos de Excel.

3.2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

En este punto se describen las distintas operaciones a las que serán sometidos los datos que se obtengan: clasificación, registro, tabulación y codificación si fuere el caso. En lo referente al análisis, se definirán las técnicas lógicas (inducción, deducción, análisis, síntesis), o estadísticas (descriptivas o inferenciales), que serán empleadas para descifrar lo que revelan los datos que sean recogidos. (Arias Odon, 1999)

Para este trabajo de investigación la técnica de procesamiento y análisis de datos es por medio de la aplicación de estadísticas.

La variable aleatoria a analizar viene dada por:

X: Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba con un equipo más el tiempo que le toma ese equipo para realizar dicha prueba.

Se toman 112 muestras (bobinas) de X por cada equipo de control de calidad. Los equipos bajo análisis para la toma de tiempos se mencionan en la siguiente sección.

3.3. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO ACTUAL

3.3.1. Identificación de las variables y/o constantes

La creación de un modelo conlleva identificar las variables y/o constantes que son relevantes para su diseño, se clasifican en variables de nivel o estado, variables de flujos, variables auxiliares y constantes.

La variable de estado o de nivel por lo general es la variable más importante de un modelo y representa magnitudes cuya evolución es significativa. Asociada a cada variable de nivel se encuentran una o varias variables de flujo.

Las variables de flujo determinan la variación de la variable de nivel respecto al tiempo, (véase *Figura 32*)

Las variables auxiliares son variables que representan pasos intermedios para la determinación de las variables de flujo a partir de las variables de nivel. (Aracil, 1995)

Finalmente, las constantes son alimentadas por valores fijos que no varía con el tiempo.

$$\frac{dX}{dt} \rightarrow X$$

Variable de flujo *Variable de estado*

Figura 32: Representación matemática entre la relación de la variable d flujo con la variable de estado
Fuente: (Aracil, 1995)

3.3.2. Identificación de las relaciones causa-efecto entre las variables

La construcción de un modelo se empieza con la identificación de las relaciones causa-efecto entre las variables, para esto el diagrama causal o de influencias es una vía muy importante que logra dicho objetivo.

El diseño de un diagrama causal comprende relacionar con flechas y el establecimiento de polaridad (+/-) que indica si una variable que recibe algún dato le afecta de forma positiva o negativa respecto al incremento de la variable que envía ese dato.

En la *Figura 33* se presenta un sencillo diagrama causal de un proceso de propagación de una epidemia. Se puede observar la relación entre las variables auxiliares “Población infectada” y “Tasa de contagio”, donde la primera variable es afectada positivamente por el incremento en el valor de segunda. Por otro lado, la relación entre las variables auxiliares “Población vulnerable” y “Población infectada” significa que la primera variable es afectada negativamente por la segunda.

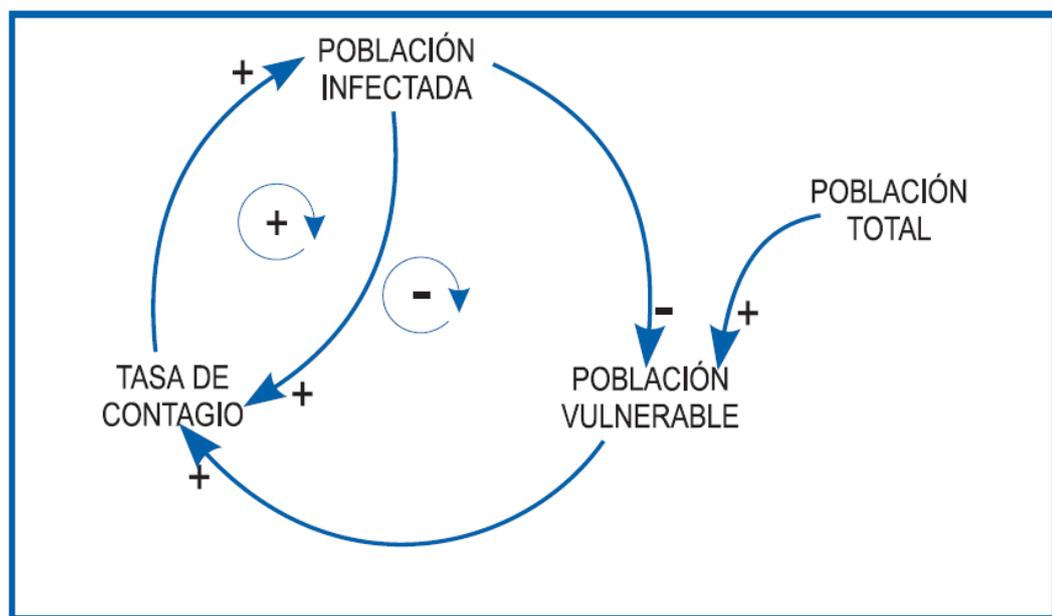


Figura 33: Diagrama causal o de influencias del proceso de propagación de una epidemia
Fuente: (Aracil, 1995)

3.4. PROGRAMACIÓN DEL MODELO ACTUAL POR COMPUTADORA

La programación del modelo actual por computadora se refiere al diseño de su estructura con sus respectivas relaciones y comportamientos con apoyo de métodos como los lenguajes de simulación.

3.5. CALIBRADO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO ACTUAL

Una vez creado el modelo actual por medio de un lenguaje de simulación, se procede a realizar el testeado de prueba y error alimentando al modelo con valores que se aproximan a la realidad del caso.

También se realiza pruebas de error para el análisis de sensibilidad de variables endógenas respecto a variaciones en los parámetros. (Caselles Moncho, 2008)

3.6. VALIDACIÓN DEL MODELO ACTUAL

Para lograr los objetivos propuestos a principio de este documento, es necesario el establecimiento de reglas, ecuaciones y/o tablas para determinar el grado de ajuste entre el modelo creado y el sistema real. (Caselles Moncho, 2008)

3.7. PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS (CREACIÓN DE ESCENARIOS)

3.7.1. Diseño optimizado del modelo por medio de técnicas lean y teoría de restricciones

Para el mejoramiento del modelo actual se realizan escenarios con variables no controladas y estrategias con variables de control, al mismo tiempo se aplican las técnicas Lean y Teorías de Restricciones con el objetivo de mejorar los tiempos de pruebas de los equipos para que de esta manera se logre la minimización o eliminación del cuello de botella generado al momento en que ingresan más bobinas al laboratorio, puesto que el supervisor sólo llega a revisar en promedio 16 bobinas en una jornada de trabajo de 8 horas, de las 40 bobinas que ingresan en promedio desde la planta de esmaltado.

3.7.2. Simulación dinámica de sistemas

En la ejecución de la simulación se lleva a cabo la combinación de escenarios por cada estrategia planteada para que de este modo se presente la propuesta para el mejoramiento de los procesos de control de calidad de bobinas.

3.7.3. Presentación de resultados y toma de decisiones

En base a cada escenario simulado en dinámica de sistemas en conjunto con la estrategia planteada se presentan los respectivos resultados de cada uno para que al final se pueda tomar los mejores casos de optimización, acorde con los intereses que tenga la compañía.

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA – CASO DE ESTUDIO

En esta sección se desarrolla el proceso del marco metodológico mencionado en la sección 2 de este documento. La aplicación metodológica se presenta en un caso de estudio en el laboratorio de esmaltado de la empresa ELECTROCABLES C.A., este departamento cumple la función de realizar el control de calidad de bobinas.

4.1. RECOLECCIÓN DE DATOS DE TIEMPOS DE PRUEBAS DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE CALIDAD

Se utiliza el software @RISK para la aproximación de datos recolectados a distribuciones de probabilidades.

En la *Tabla 11* se detallan algunas medidas de estadísticas descriptivas sobre datos recolectados *in situ* de tiempos de pruebas de Choque Térmico, así como también de las respectivas distribuciones (Triangular y Exponencial) que pudieron ajustarse a dichos datos reales.

	Entrada	Triang	Expon
Mínimo	35,165400	35,165400	35,165178
Máximo	35,199800	35,201755	+∞
Media	35,174289	35,177518	35,174067
Moda	≈35,178000	35,165400	35,165178
Mediana	35,171000	35,176048	35,171339
Desv Est	0,008815	0,008569	0,008889
Asimetría	1,1721	0,5657	2,0000
Curtosis	4,2345	2,4000	9,0000
Izquierda X	35,16586	35,16586	35,16586
Izquierda P	5,0%	2,5%	7,4%
Derecha X	35,19601	35,19601	35,19601
Derecha P	95,0%	97,5%	96,9%
Dif X	0,030149	0,030149	0,030149
Dif P	90,0%	95,0%	89,5%

Tabla 11: Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Choque Térmico y de las distribuciones ajustadas Triangular y Exponencial.

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la *Tabla 11* que la distribución que más se ajustó a los datos de tiempos según la prueba de comparación de ajuste Chi-cuadrado (véase *Figura 34*) fue la distribución Triangular (véase también *Figura 35*), debido a que obtuvo el menor valor de esta prueba respecto a otras distribuciones.

Clasificar pc		Chi-cuad
	Ajuste	Valor
<input checked="" type="checkbox"/>	Triang	31,8000
<input type="checkbox"/>	Pareto	33,8000
<input type="checkbox"/>	Logistic	37,2000
<input checked="" type="checkbox"/>	Expon	40,0000

Figura 34: F1 Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Choque Térmico según la prueba Chi-cuadrado.

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que en la *Figura 34* las distribuciones de Pareto y Logística no se nombran en ningún momento (*checkbox* inactivo), porque posteriormente se llevará a cabo el análisis de sensibilidad de un modelo actual detallado más adelante, mediante un software de simulación donde tales distribuciones no se encuentran definidas.

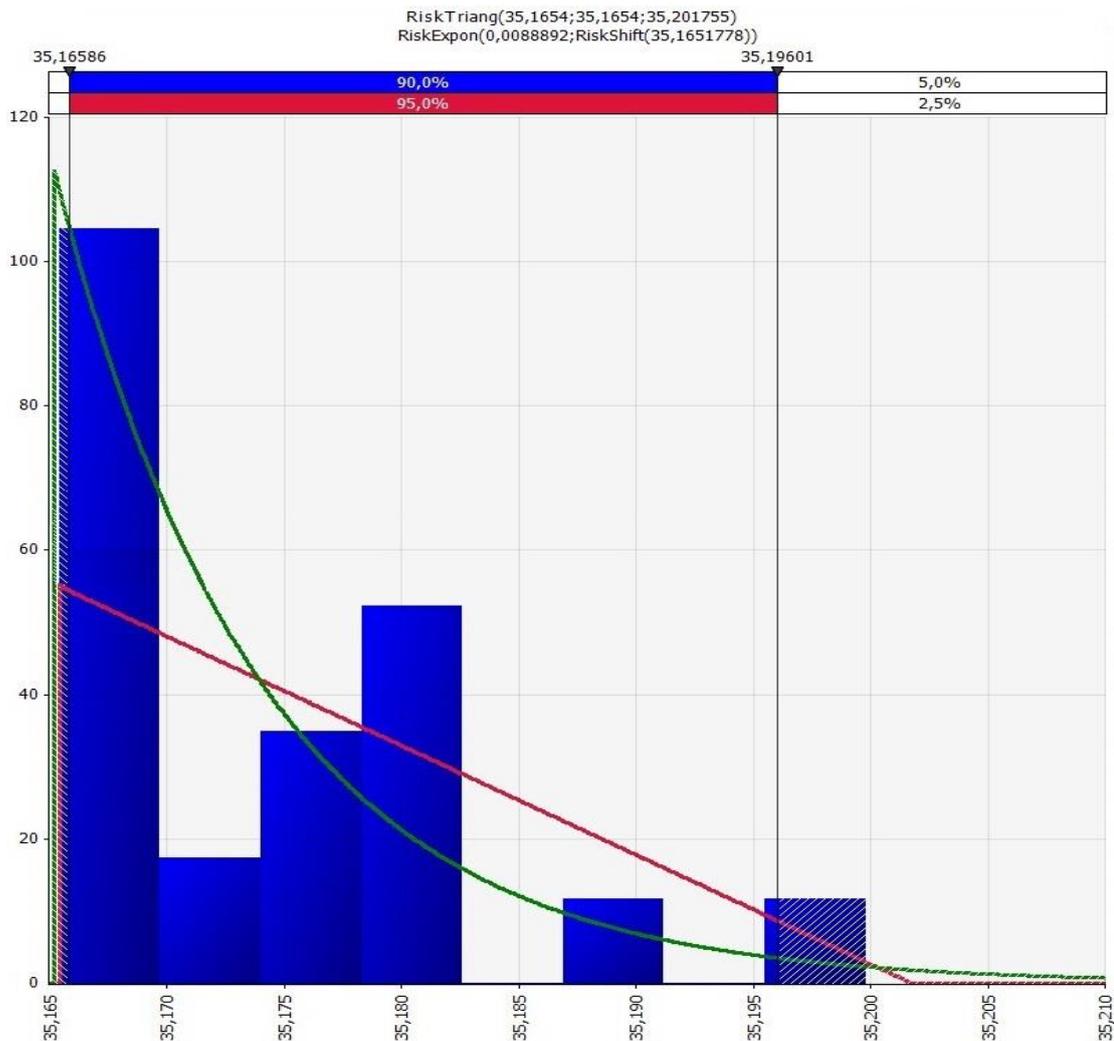


Figura 35: Comparación de ajuste (Chi-cuadrado) para tiempos de pruebas de Choque Térmico.

Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 12* se detallan algunas medidas de estadísticas descriptivas sobre datos recolectados *in situ* de tiempos de pruebas de Resistencia de Aislamiento, así como también de las respectivas distribuciones (Gaussiana Inversa y Exponencial) que pudieron ajustarse a dichos datos reales.

	Entrada	Invgauss	Expon
Mínimo	10,3700	10,350	10,3498
Máximo	18,3000	+∞	+∞
Media	11,1783	11,178	11,1580
Moda	≈10,3900	10,391	10,3498
Mediana	10,5500	10,553	10,9100
Desv Est	1,8976	2,135	0,8083
Asimetría	3,3156	7,7336	2,0000
Curtosis	13,0183	102,6819	9,0000
Izquierda X	10,37	10,37	10,37
Izquierda P	5,0%	2,5%	2,9%
Derecha X	16,43	16,43	16,43
Derecha P	95,0%	97,5%	99,9%
Dif X	6,0527	6,053	6,0527
Dif P	90,0%	95,0%	97,0%

Tabla 12: Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Resistencia de Aislamiento y de las distribuciones ajustadas Gaussiana Inversa y Exponencial.
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la *Tabla 12* que la distribución que más se ajustó a los datos de tiempos según la prueba de comparación de ajuste Chi-cuadrado (véase *Figura 36*) fue la distribución Gaussiana Inversa (véase también *Figura 37*), debido a que obtuvo el menor valor de esta prueba respecto a otras distribuciones.

Clasificar pc		Chi-cuad
Ajuste	Valor	
<input checked="" type="checkbox"/> Invgauss	14,0000	
<input type="checkbox"/> Lognorm	16,0000	
<input type="checkbox"/> Levy	20,8000	
<input type="checkbox"/> Pearson5	22,4000	
<input type="checkbox"/> Pareto	35,2000	
<input checked="" type="checkbox"/> Expon	42,8000	

Figura 36: Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Resistencia de Aislamiento según la prueba Chi-cuadrado.

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que en la *Figura 36* las distribuciones Log-normal, Lévy, Pearson Tipo 5 y Pareto no se nombran en ningún momento (*checkbox* inactivo), porque posteriormente se llevará a cabo el análisis de sensibilidad de un modelo actual

detallado más adelante, mediante un software de simulación donde tales distribuciones (incluida la distribución Gaussiana Inversa) no se encuentran definidas. Por lo tanto, la distribución Exponencial será la alternativa para lograr dicho objetivo.

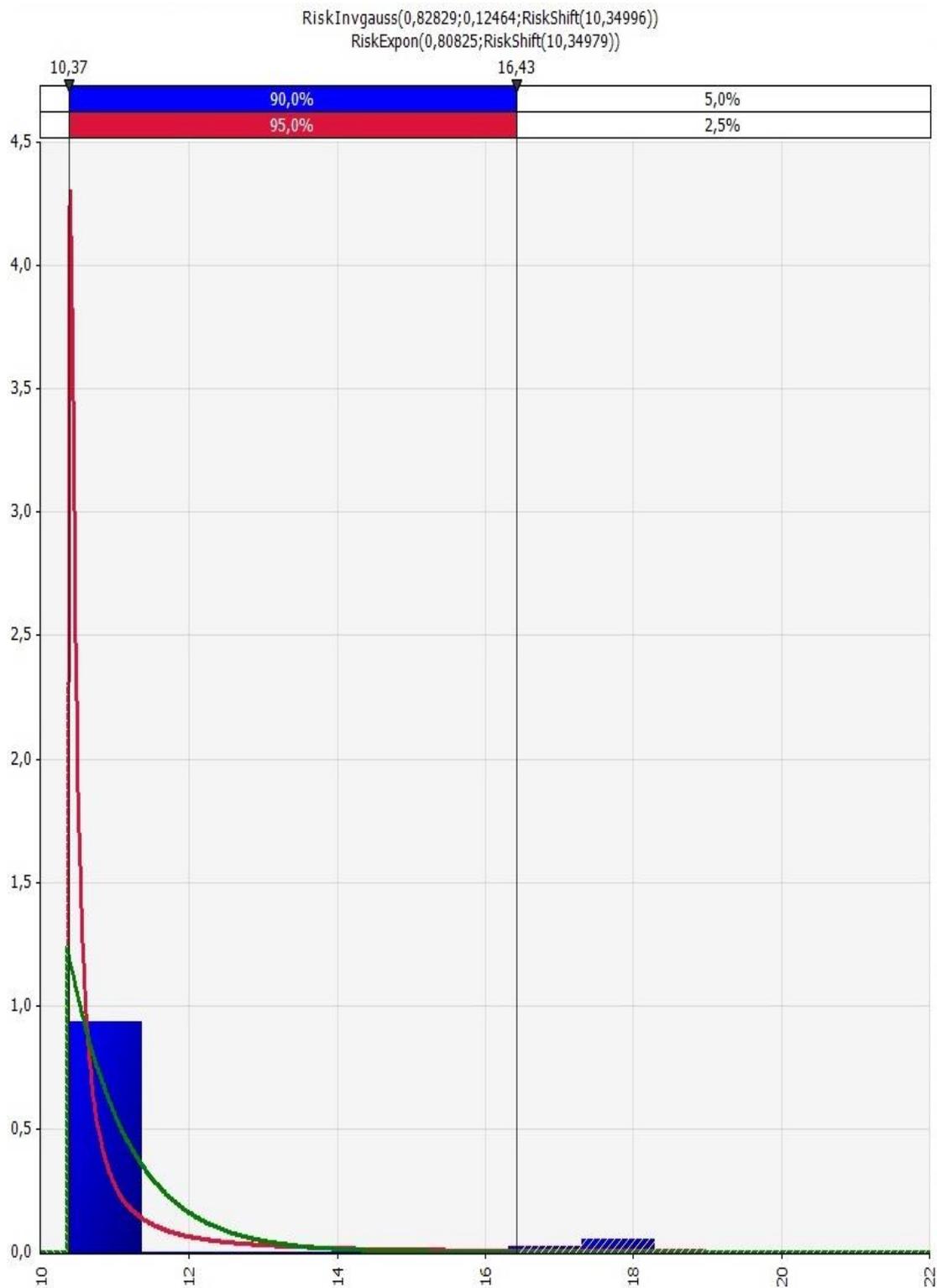


Figura 37: Comparación de ajuste (Chi-cuadrado) para tiempos de pruebas de Resistencia de Aislamiento

Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 13* se detallan algunas medidas de estadísticas descriptivas sobre datos recolectados *in situ* de tiempos de pruebas de Continuidad, así como también de las respectivas distribuciones (Laplace y Triangular) que pudieron ajustarse a dichos datos reales.

	Entrada	Laplace	Triang
Mínimo	9,35000	-∞	9,35000
Máximo	10,02000	+∞	10,08183
Media	9,54450	9,53500	9,59394
Moda	≈9,49000	9,53500	9,35000
Mediana	9,53000	9,53500	9,56435
Desv Est	0,15327	0,12869	0,17249
Asimetría	2,0359	0,0000	0,5657
Curtosis	7,9610	6,0000	2,4000
Izquierda X	9,262	9,262	9,262
Izquierda P	0,0%	2,5%	0,0%
Derecha X	9,808	9,808	9,808
Derecha P	92,5%	97,5%	86,0%
Dif X	0,54521	0,54521	0,54521
Dif P	92,5%	95,0%	86,0%

Tabla 13: T3 Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Continuidad y de las distribuciones ajustadas de Laplace y Triangular.

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la *Tabla 13* que la distribución que más se ajustó a los datos de tiempos según la prueba de comparación de ajuste Chi-cuadrado (véase *Figura 38*) fue la distribución de Laplace (véase también *Figura 39*), debido a que obtuvo el menor valor de esta prueba respecto a otras distribuciones.

Clasificar pc		Chi-cuad
	Ajuste	Valor
<input checked="" type="checkbox"/>	Laplace	18,0000
<input type="checkbox"/>	Logistic	25,6000
<input checked="" type="checkbox"/>	Triang	27,8000

Figura 38: Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Continuidad según la prueba Chi-cuadrado.

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que en la *Figura 38* la distribución Logística no se nombra en ningún momento (*checkbox* inactivo), porque posteriormente se llevará a cabo el análisis de sensibilidad de un modelo actual detallado más adelante, mediante un software de simulación donde tales distribuciones (incluida la distribución de

En la *Tabla 14* se detallan algunas medidas de estadísticas descriptivas sobre datos recolectados *in situ* de tiempos de pruebas de Rigidez Dieléctrica, así como también de las respectivas distribuciones (Laplace y Gamma) que pudieron ajustarse a dichos datos reales.

	Entrada	Laplace	Gamma
Mínimo	2,3500	$-\infty$	1,5144
Máximo	4,5200	$+\infty$	$+\infty$
Media	3,3160	3,2250	3,3160
Moda	$\approx 3,3500$	3,2250	3,2104
Mediana	3,1900	3,2250	3,2809
Desv Est	0,4554	0,3939	0,4362
Asimetría	1,1550	0,0000	0,4842
Curtosis	5,3154	6,0000	3,3517
Izquierda X	2,391	2,391	2,391
Izquierda P	2,5%	2,5%	0,5%
Derecha X	4,059	4,059	4,059
Derecha P	87,5%	97,5%	94,4%
Dif X	1,6686	1,6686	1,6686
Dif P	85,0%	95,0%	93,9%

Tabla 14: T4 Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Rigidez Dieléctrica y de las distribuciones ajustadas de Laplace y Gamma.

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la *Tabla 14* que la distribución que más se ajustó a los datos de tiempos según la prueba de comparación de ajuste Chi-cuadrado (véase *Figura 40*) fue la distribución de Laplace (véase también *Figura 41*), debido a que obtuvo el menor valor de esta prueba respecto a otras distribuciones.

Clasificar pc		Chi-cuad
	Ajuste	Valor
<input checked="" type="checkbox"/>	Laplace	13,6000
<input type="checkbox"/>	Logistic	20,8000
<input type="checkbox"/>	Loglogistic	23,6000
<input type="checkbox"/>	Invgauss	31,2000
<input type="checkbox"/>	Lognorm	31,2000
<input type="checkbox"/>	Pearson5	31,2000
<input type="checkbox"/>	ExtValue	33,2000
<input type="checkbox"/>	Erlang	40,0000
<input checked="" type="checkbox"/>	Gamma	40,0000

Figura 40: Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Rigidez Dieléctrica según la prueba Chi-cuadrado.

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que en la *Figura 40* las distribuciones Logística, Log-logística, Gaussiana Inversa, Log-normal, Pearson Tipo 5, Valor Extremo, y Erlang no

se nombran en ningún momento (*checkbox* inactivo), porque posteriormente se llevará a cabo el análisis de sensibilidad de un modelo actual detallado más adelante, mediante un software de simulación donde tales distribuciones (incluida la distribución de Laplace) no se encuentran definidas. Por lo tanto, la distribución Gamma será la alternativa para lograr dicho objetivo.

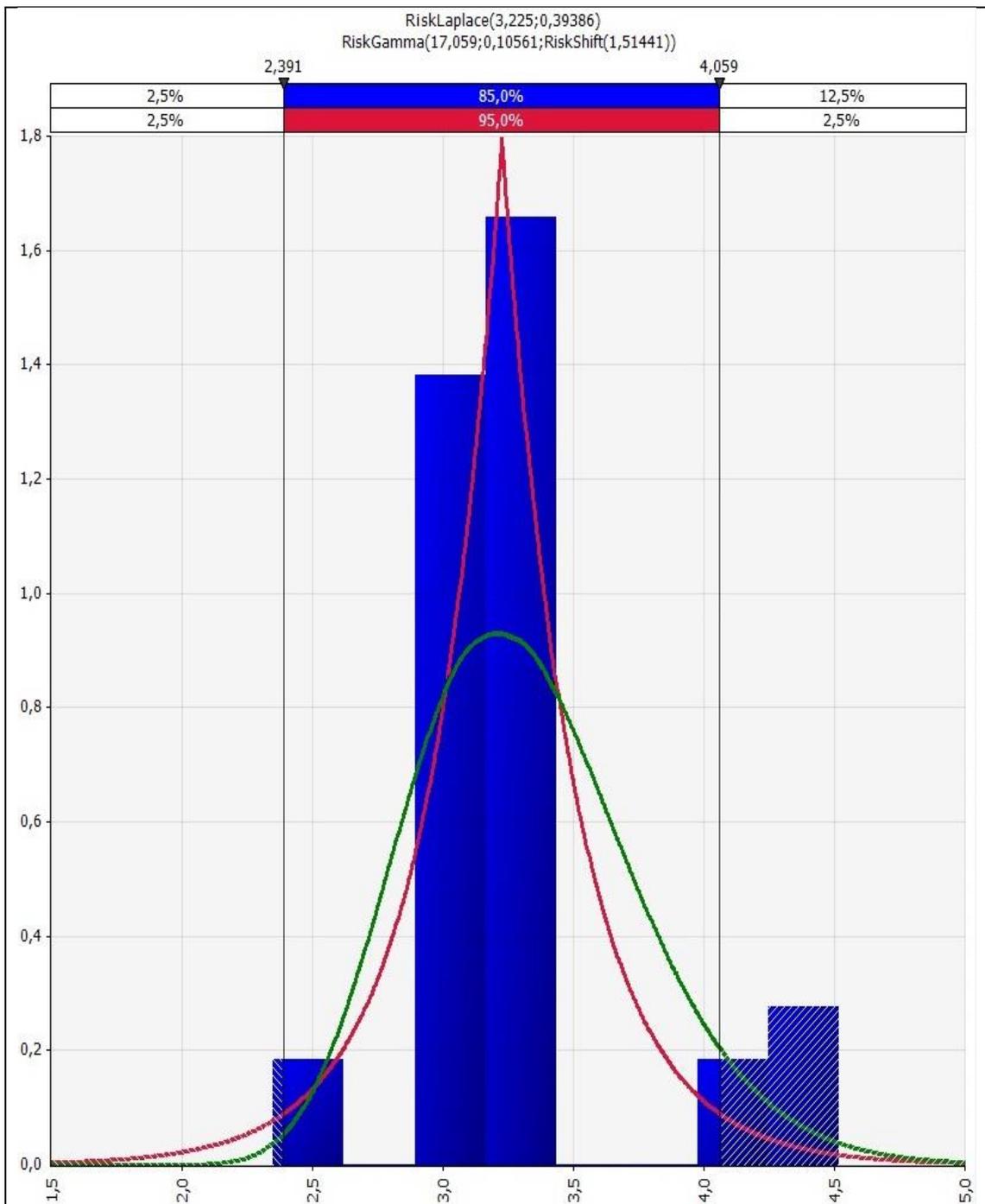


Figura 41: Comparación de ajuste (Chi-cuadrado) para tiempos de pruebas de Rigidez Dieléctrica

Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 15* se detallan algunas medidas de estadísticas descriptivas sobre datos recolectados *in situ* de tiempos de pruebas de Elongación, así como también de las respectivas distribuciones (Log-logística y Exponencial) que pudieron ajustarse a dichos datos reales.

	Entrada	Loglogistic	Expon
Mínimo	1,01000	0,99627	1,00805
Máximo	1,42000	$+\infty$	$+\infty$
Media	1,08800	1,08678	1,08605
Moda	$\approx 1,05000$	1,04695	1,00805
Mediana	1,07000	1,06594	1,06212
Desv Est	0,08606	0,10078	0,07800
Asimetría	2,7521	N/A	2,0000
Curtosis	10,7999	N/A	9,0000
Izquierda X	1,0131	1,0131	1,0131
Izquierda P	5,0%	2,5%	6,2%
Derecha X	1,2853	1,2853	1,2853
Derecha P	92,5%	97,5%	97,1%
Dif X	0,27221	0,27221	0,27221
Dif P	87,5%	95,0%	90,9%

Tabla 15: Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Elongación y de las distribuciones ajustadas Log-logística y Exponencial.

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la *Tabla 15* que la distribución que más se ajustó a los datos de tiempos según la prueba de comparación de ajuste Chi-cuadrado (véase *Figura 42*) fue la distribución Log-Logística (véase también *Figura 43*), debido a que obtuvo el menor valor de esta prueba respecto a otras distribuciones.

Clasificar por		Chi-cuad
Ajuste		Valor
<input checked="" type="checkbox"/>	Loglogistic	8,8000
<input type="checkbox"/>	Laplace	9,2000
<input type="checkbox"/>	Logistic	11,6000
<input type="checkbox"/>	Lognorm	12,0000
<input type="checkbox"/>	Pearson5	12,0000
<input checked="" type="checkbox"/>	Expon	12,4000

Figura 42: F9 Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Elongación según la prueba Chi-cuadrado.

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que en la *Figura 42* las distribuciones Laplace, Logística, Log-normal y Pearson Tipo 5 no se nombran en ningún momento (*checkbox* inactivo), porque posteriormente se llevará a cabo el análisis de sensibilidad de un

modelo actual detallado más adelante, mediante un software de simulación donde tales distribuciones (incluida la distribución Log-Logística) no se encuentran definidas. Por lo tanto, la distribución Exponencial será la alternativa para lograr dicho objetivo.

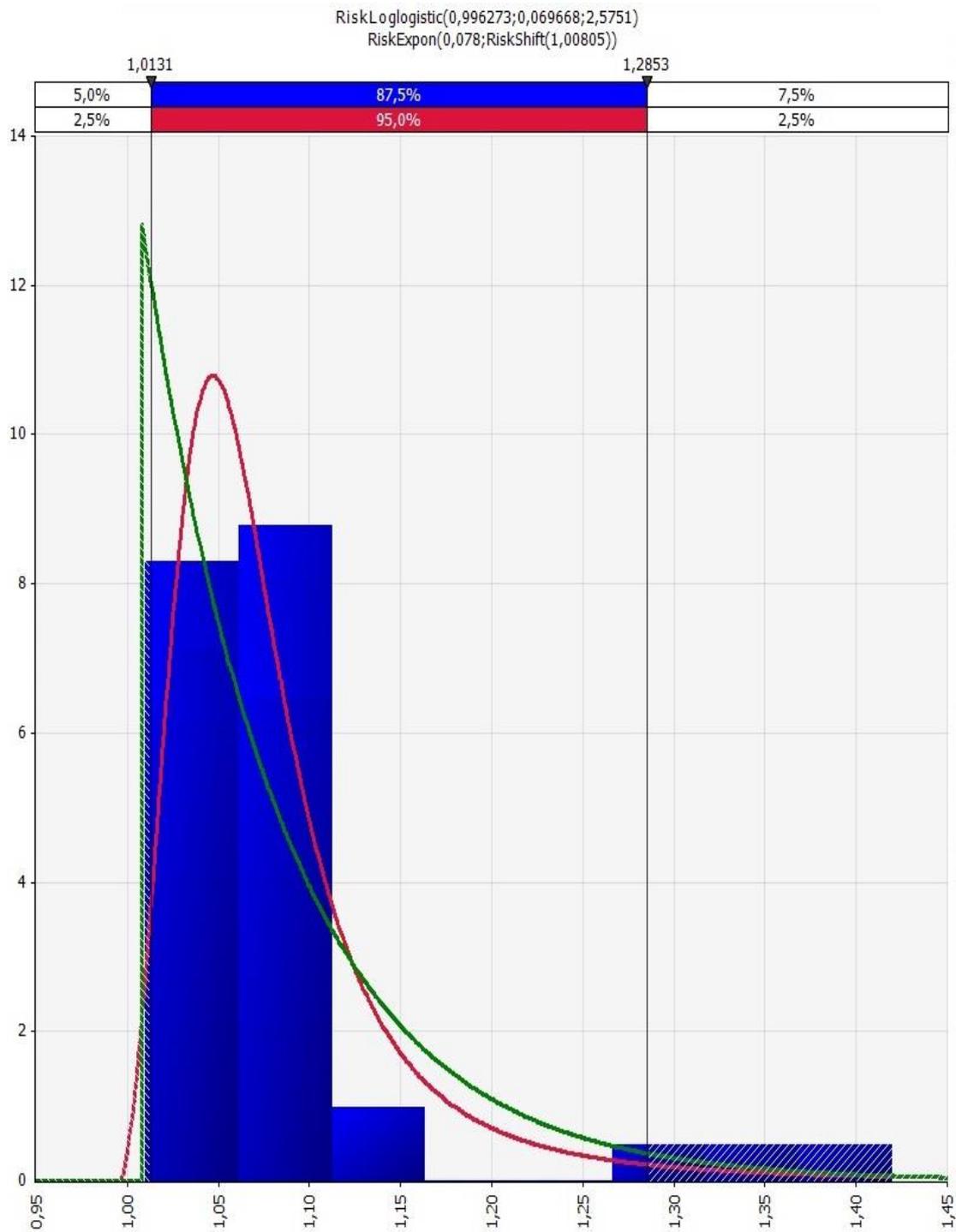


Figura 43: Comparación de ajuste (Chi-cuadrado) para tiempos de pruebas de Elongación
Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 16* se detallan algunas medidas de estadísticas descriptivas sobre datos recolectados *in situ* de tiempos de pruebas de Diámetro, así como también de las respectivas distribuciones (Exponencial y Triangular) que pudieron ajustarse a dichos datos reales.

	Entrada	Expon	Triang
Mínimo	2,15000	2,14831	2,15000
Máximo	2,36000	+∞	2,37684
Media	2,21750	2,21581	2,22561
Moda	≈2,15000	2,14831	2,15000
Mediana	2,20000	2,19510	2,21644
Desv Est	0,05462	0,06750	0,05347
Asimetría	1,0663	2,0000	0,5657
Curtosis	3,4598	9,0000	2,4000
Izquierda X	2,1500	2,1500	2,1500
Izquierda P	7,5%	2,5%	0,0%
Derecha X	2,3973	2,3973	2,3973
Derecha P	100,0%	97,5%	100,0%
Dif X	0,24729	0,24729	0,24729
Dif P	92,5%	95,0%	100,0%

Tabla 16: Estadísticas descriptivas de datos recolectados de tiempos de pruebas de Diámetro y de las distribuciones ajustadas Exponencial y Triangular.

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la *Tabla 16* que la distribución que más se ajustó a los datos de tiempos según la prueba de comparación de ajuste Chi-cuadrado (véase *Figura 44*) fue la distribución Exponencial (véase también *Figura 45*), debido a que obtuvo el menor valor de esta prueba respecto a otras distribuciones.

Clasificar pc		Chi-cuad
	Ajuste	Valor
<input checked="" type="checkbox"/>	Expon	4,0000
<input type="checkbox"/>	Pareto	4,0000
<input type="checkbox"/>	ExtValue	4,8000
<input checked="" type="checkbox"/>	Triang	6,4000

Figura 44: Clasificación de las distribuciones que se ajustaron a los datos de tiempos de pruebas de Diámetro según la prueba Chi-cuadrado.

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que en la *Figura 44* las distribuciones de Pareto y Valor Extremo no se nombran en ningún momento (*checkbox* inactivo), porque posteriormente se llevará a cabo el análisis de sensibilidad de un modelo actual detallado más adelante, mediante un software de simulación donde tales distribuciones

no se encuentran definidas. Por lo tanto, la distribución Exponencial será la alternativa para lograr dicho objetivo.

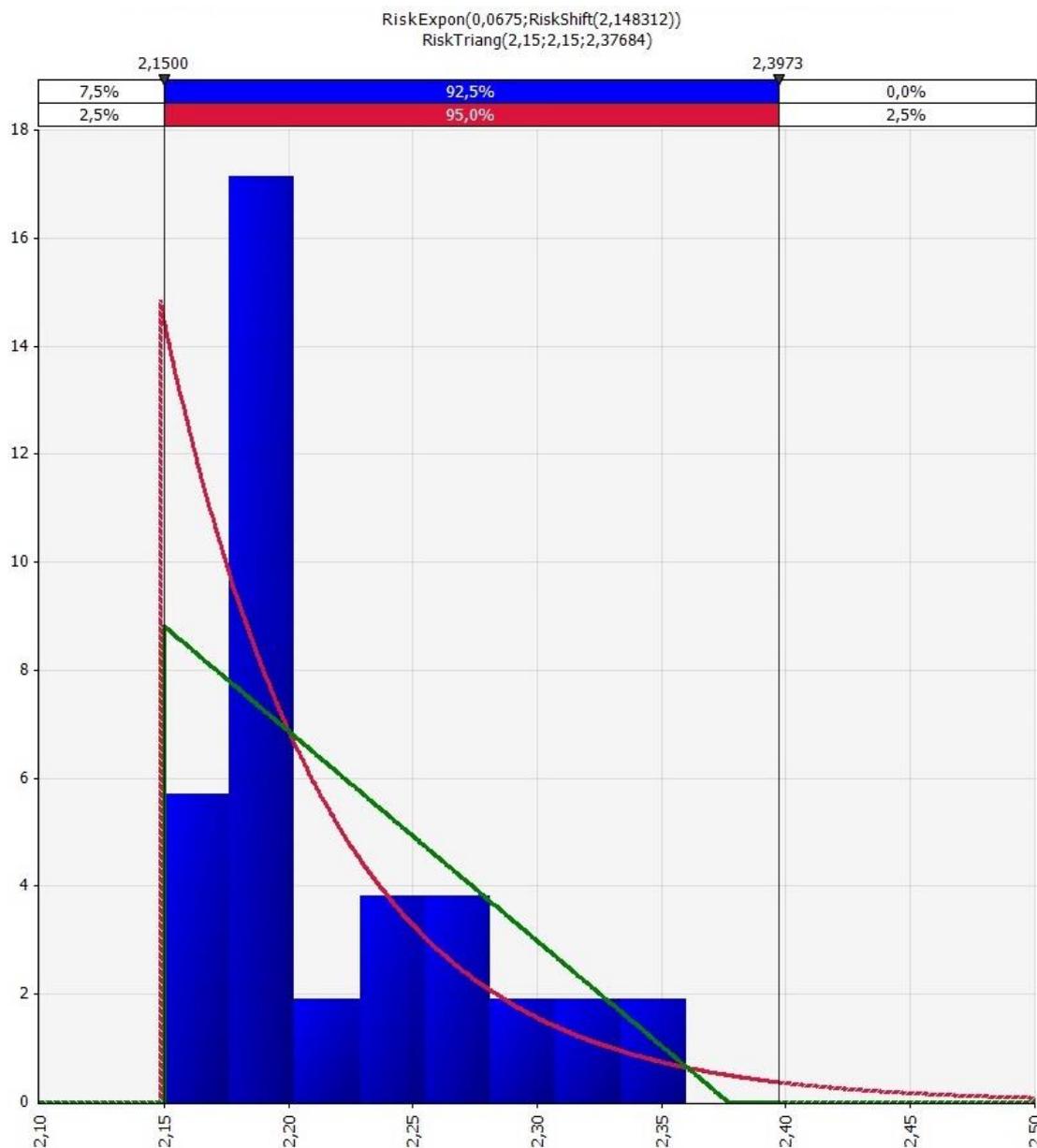


Figura 45: Comparación de ajuste (Chi-cuadrado) para tiempos de pruebas de Diámetro
Fuente: Elaboración propia

4.2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO ACTUAL

En el laboratorio de esmaltado existen diez equipos de pruebas para el control de calidad de bobinas. En la *Figura 46* se presenta el diagrama de procesos.

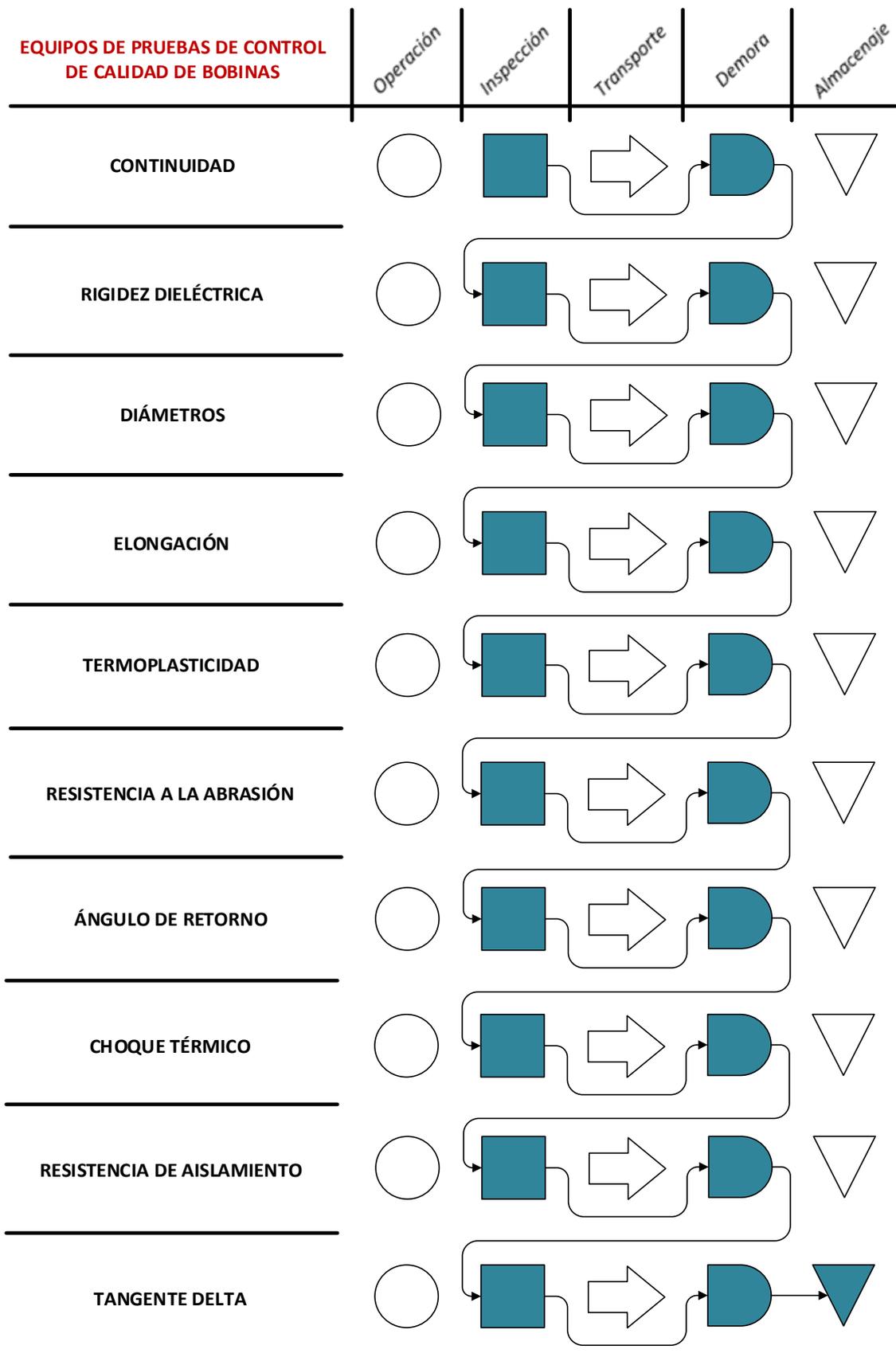


Figura 46: Diagrama de procesos para el control de calidad de bobinas
Fuente: Elaboración propia

Es necesario mencionar que dicho orden de proceso no es obligatorio, porque actualmente es posible inspeccionar a lo mucho tres bobinas usando diferentes equipos de pruebas para ahorrar tiempo, ocasionando de este modo la alteración del orden de revisión.

Entre los diez equipos mencionados en la *Figura 46* sólo seis son necesariamente utilizados para realizar las pruebas con normalidad y que serán analizados en este trabajo de investigación, los demás equipos son considerados complementarios según la experiencia del supervisor y por ende no forma parte del estudio de caso. Los equipos complementarios son:

- Equipo de Termoplasticidad
- Equipo de Resistencia a la Abrasión
- Equipo de Ángulo de Retorno
- Equipo Tangente Delta

4.2.1. Equipos de control de calidad de bobinas

En esta sección se describirá brevemente sobre los procesos de los equipos de control de calidad más utilizados normalmente para ejecutar las pruebas en los alambres esmaltados de cada bobina.

4.2.1.1. Prueba de Choque Térmico

En esta prueba se ponen 5 muestras de alambres esmaltados por bobina durante 30 [min] a 220 [°C], después de ese tiempo la muestra no debe salir con algún daño físico o químico, es decir que no debe existir desprendimiento de esmalte ni fallas por ningún motivo.

Para realizar este tipo de pruebas es necesario tener las siguientes herramientas de trabajo mostradas a continuación:

- Horno de circulación forzada de aire, (véase *Figura 47*)

- Lupa
- Mandriles (Tres veces el diámetro del alambre esmaltado)



Figura 47: Equipo de Choque Térmico

Fuente: Laboratorio de Esmaltado de Control de Calidad de Bobinas – Electrocables C.A.

4.2.1.2. Prueba de Resistencia de Aislamiento

Esta prueba es especialmente realizada para cliente estrictos en cuanto a la calidad extrema se refiere, porque su intervención demuestra por excelencia de que el alambre esmaltado de la bobina tiene una resistencia alta de aislamiento. Se la realiza con un equipo marca Megger para la aplicación de un alto voltaje sobre el cobre de la bobina, se usa conjuntamente un equipo automatizado que contiene una bandeja con agua donde se conecta a tierra desde el equipo Megger y a través de esta bandeja el alambre esmaltado se sumerge.

Para realizar este tipo de pruebas es necesario tener las siguientes herramientas de trabajo mostradas a continuación:

- Equipo Megger
- Laptop
- Equipo de prueba con agua en la bandeja, (véase *Figura 48*)



Figura 48: Equipo de Resistencia de Aislamiento

Fuente: Laboratorio de Esmaltado de Control de Calidad de Bobinas – Electrocables C.A.

4.2.1.3. Prueba de Continuidad

La prueba de Continuidad en los alambres esmaltados se refiere a la uniformidad en la aplicación y curado del esmalte dieléctrico con respecto al hilo de cobre, el cual al aplicarle un voltaje mantiene su capacidad de aislante hasta máximo 5 fallas.

Para realizar este tipo de pruebas es necesario tener las siguientes herramientas de trabajo mostradas a continuación:

- Probador de voltaje: “High Voltage Continuity Tester”, (véase *Figura 49*)
- Guantes para protección eléctrica
- Lija para el retiro de aislante del alambre



Figura 49: Equipo de Continuidad

Fuente: Laboratorio de Esmaltado de Control de Calidad de Bobinas – Electrocables C.A.

4.2.1.4. Prueba de Rigidez Dieléctrica

Esta prueba mide la resistencia dieléctrica del alambre esmaltado y la realiza mediante el incremento de voltaje desde 0 [v] hasta llegar al punto máximo de resistencia del alambre, y este valor es comparado con el valor mínimo que indica la norma NEMA.

Para realizar este tipo de pruebas es necesario tener las siguientes herramientas de trabajo mostradas a continuación:

- Equipo de Rigidez Dieléctrica, (véase *Figura 50*)
- Trenzador de muestras
- Pesos



Figura 50: Equipo de Rigidez Dieléctrica

Fuente: Laboratorio de Esmaltado de Control de Calidad de Bobinas – Electrocables C.A.

4.2.1.5. Prueba de Elongación

Este tipo de prueba verifica el nivel de resistencia del alambre esmaltado al elongarlo o estirarlo (proceso físico), hasta llegar al punto de ruptura y por la cual debe cumplir con un mínimo según la norma NEMA, y dependiendo de esos valores se decide si cumple o no con el sometimiento de dicha prueba.

Para realizar este tipo de pruebas es necesario tener las siguientes herramientas de trabajo mostradas a continuación:

- Equipo de Elongación tipo 6003, véase (*Figura 51*)
- Regla graduada



Figura 51: Equipo de Elongación

Fuente: Laboratorio de Esmaltado de Control de Calidad de Bobinas – Electrocables C.A.

4.2.1.6. Prueba de Diámetro

En este ensayo se mide los diámetros del alambre esmaltado en 4 posiciones de (0° , 90° , 180° y 270°) al desnudo o cobre sin esmalte y esmaltado, la diferencia de estos valores dará el incremento de esmalte y se verifica dicho valor con la norma NEMA.

Para realizar este tipo de pruebas es necesario tener las siguientes herramientas de trabajo mostradas a continuación:

- Micrómetro de 0,001 [mm], véase (*Figura 52*)
- Calculadora
- Mechero



Figura 52: Equipo de Diámetro

Fuente: Laboratorio de Esmaltado de Control de Calidad de Bobinas – Electrocables C.A.

4.2.2. Lista de variables y especificaciones en el modelo actual

Se toma como punto de partida la clasificación de variables de estado, flujo, auxiliares y constantes que construyen el modelo actual. En la *Tabla 17* se muestra la

clasificación de las variables de estado y de flujo, en la *Tabla 18* la clasificación de las variables auxiliares y en la *Tabla 19* se presenta la clasificación de constantes.

<i>Código</i>	<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>
(N_CH-T)	Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Choque Térmico	VARIABLES DE NIVEL O ESTADO
(N_R-A)	Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Resistencia de Aislamiento	
(N_C)	Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Continuidad	
(N_R-D)	Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Rigidez Dieléctrica	
(N_E)	Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Elongación	
(N_D)	Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Diámetro	
(F-E_CH-T)	Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Choque Térmico	VARIABLES DE FLUJO
(F-S_CH-T)	Bobinas rechazadas por la prueba de Choque Térmico	
(F-E_R-A)	Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Resistencia de Aislamiento	
(F-S_R-A)	Bobinas rechazadas por la prueba de Resistencia de Aislamiento	
(F-E_C)	Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Continuidad	
(F-S_C)	Bobinas rechazadas por la prueba de Continuidad	
(F-E_R-D)	Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Rigidez Dieléctrica	
(F-S_R-D)	Bobinas rechazadas por la prueba de Rigidez Dieléctrica	
(F-E_E)	Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Elongación	
(F-S_E)	Bobinas rechazadas por la prueba de Elongación	
(F-E_D)	Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Diámetro	
(F-S_D)	Bobinas rechazadas por la prueba de Diámetro	
<i>Tabla 17: Clasificación de las variables de nivel y de flujo del modelo actual</i>		
<i>Fuente: Elaboración propia</i>		

<i>Código</i>	<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>
(A_l)	Ciclo de bobinas no revisadas por inactividad debido al lunch	VARIABLES AUXILIARES
(A_h)	Horas de trabajo	
(A_CH-T-m)	Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico	
(A_c)	Tiempo que dura el ciclo de las pruebas excluyendo la prueba de Choque Térmico	
(A_CH-T-p)	Tiempo que dura el proceso de prueba de Choque Térmico para las bobinas	
(A_CH-T-c)	Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Choque Térmico para las bobinas	
(A_R-A-i)	Tiempo inicial del proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento	
(A_R-A-p)	Tiempo que dura el proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas	
(A_R-A-c)	Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas	
(A_C -i)	Tiempo inicial del proceso de prueba de Continuidad	
(A_C-p)	Tiempo que dura el proceso de prueba de Continuidad para las bobinas	
(A_C-c)	Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Continuidad para las bobinas	
(A_R-D-i)	Tiempo inicial del proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica	
(A_R-D-p)	Tiempo que dura el proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica para las bobinas	
(A_R-D-c)	Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Rigidez Dieléctrica para las bobinas	
(A_E-i)	Tiempo inicial del proceso de prueba de Elongación	
(A_E-p)	Tiempo que dura el proceso de prueba de Elongación para las bobinas	
(A_E-c)	Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Elongación para las bobinas	
(A_D-i)	Tiempo inicial del proceso de prueba de Diámetro	
(A_D-p)	Tiempo que dura el proceso de prueba de Diámetro para las bobinas	
(A_D-c)	Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Diámetro para las bobinas	
(A_C-C)	Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad	

Tabla 18: Clasificación de las variables auxiliares del modelo actual
Fuente: Elaboración propia

Código	Nombre	Tipo
(C_l)	Tiempo que dura el lunch	CONSTANTE
(C_ft)	FINAL TIME	
(C_ts)	TIME STEP	
(C_b)	Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas	
(C_d)	Tiempo que descansa el empleado por cambio del ciclo de las pruebas	
(C_v)	Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra	
(C_CH-T-m)	Tiempo que el empleado utiliza para preparar una muestra previo a la prueba de Choque Térmico	
(C_R-A-m)	Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento	
(C_C -m)	Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Continuidad	
(C_R-D-m)	Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Rigidez Dieléctrica	
(C_E-m)	Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Elongación	
(C_D-m)	Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Diámetro	
(C_C -d)	Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Continuidad	
(C_R-D -d)	Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Rigidez Dieléctrica	
(C_E -d)	Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Elongación	
(C_CH-T-i)	Tiempo inicial del proceso de prueba de Choque Térmico	

Tabla 19: Clasificación de las constantes del modelo actual

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Diagramas causales del modelo actual

En esta sección se presenta los respectivos diagramas causales que forman el modelo actual y se detalla el funcionamiento de cada uno de ellos.

El modelo actual se estructura con ocho diagramas causales y el criterio principal para su diseño viene dado en el orden (mayor a menor) de los tiempos promedios de pruebas que tardan los equipos en revisar los alambres esmaltados.

4.2.3.1. Diagrama causal de inicio

Es el primer diagrama causal del modelo actual que contiene el 87,5% de las constantes y por lo tanto se la considera como el diagrama de control de todo el modelo.

En la *Figura 53* se presenta el diagrama que está compuesto por cuatro variables auxiliares y catorce constantes.

La variable auxiliar “Tiempo que dura el ciclo de las pruebas excluyendo la prueba de Choque Térmico”, tiene un efecto positivo por el incremento en el valor de diez constantes que se presentan a continuación:

- Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Continuidad
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Rigidez Dieléctrica
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Elongación
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Diámetro

- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Continuidad
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Rigidez Dieléctrica
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Elongación
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra

Es importante mencionar que esta variable auxiliar excluye la prueba de Choque Térmico debido a que este equipo puede realizar las tres pruebas simultáneamente, situación que no ocurre en las demás, es decir, que todas las pruebas excepto la de Choque Térmico pueden realizar sólo una prueba estando las otras dos muestras en espera o en cola hasta que se termine la prueba que se inició.

Por tal motivo se le da un tratamiento especial a la prueba de Choque Térmico. La variable auxiliar “Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico”, es afectaba positivamente por el aumento en el valor de dos constantes:

- Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar una muestra previo a la prueba de Choque Térmico

La variable auxiliar “Ciclo de bobinas no revisadas por inactividad debido al lunch”, tiene un efecto positivo por el incremento en el valor de la constante “<FINAL TIME>”, pero es afectaba negativamente por el aumento en el valor de la constante “Tiempo que dura el lunch”.

Finalmente, la variable auxiliar “Horas de trabajo”, tiene un efecto positivo por el incremento en el valor de la constante “<FINAL TIME>”.

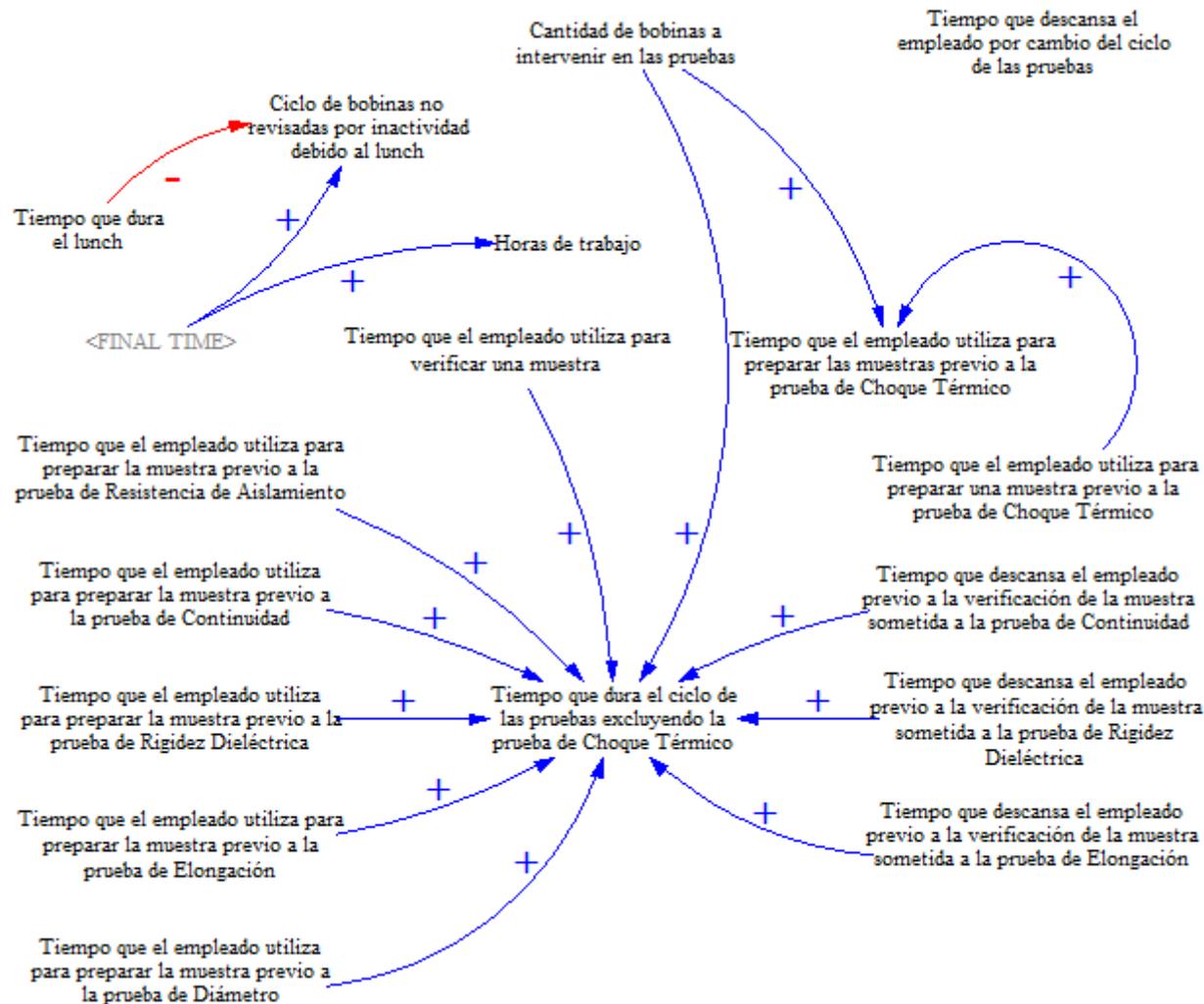


Figura 53: Diagrama causal de inicio
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2. Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Choque Térmico

Es el segundo diagrama causal del modelo actual. En la *Figura 54* se presenta el diagrama que está compuesto por una variable de nivel, dos variables de flujo, seis variables auxiliares y seis constantes.

La variable de nivel “Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Choque Térmico”, se refiere al número de bobinas inspeccionadas por este equipo sin considerar las defectuosas, esta variable de estado varía con la diferencia entre los valores de la variable de flujo de entrada “Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Choque Térmico” y los valores la variable de flujo de salida “Bobinas rechazadas por la prueba de Choque Térmico”, siendo los valores del primer flujo mayores que el segundo.

La variable de nivel previamente mencionada es afectada positivamente por el incremento en el valor de la constante “Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas”, pero afectada negativamente por el aumento en el valor de dos variables auxiliares mencionadas a continuación:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Choque Térmico para las bobinas
- Ciclo de bobinas no revisadas por inactividad debido al lunch

Esta variable de estado también tiene un efecto negativo por el incremento en el valor de la constante “Tiempo que dura el lunch” y un efecto neutro con la variación de los valores de la constante “<TIME STEP>”

Respecto a la variable de flujo de entrada, se refiere a la variación que sufre el ciclo del proceso de ejecución de la prueba de Choque Térmico mediante alteraciones del tiempo, este ciclo sigue un patrón y tiene un efecto positivo cuando se aumenta el valor de la variable auxiliar “Horas de trabajo”, pero un efecto negativo por el

incremento en el valor de dos variables auxiliares y una constante mencionadas a continuación:

- Tiempo inicial del proceso de prueba de Choque Térmico (constante)
- Tiempo que dura el proceso de prueba de Choque Térmico para las bobinas (variable auxiliar)
- Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Choque Térmico para las bobinas (variable auxiliar)

La variable de flujo de salida no tiene dependencia con variables auxiliares ni constantes, pero según la experiencia del supervisor encargado de la ejecución de las pruebas indica que se detectan a lo mucho cinco bobinas defectuosas por semana.

Respecto a la variable auxiliar “Tiempo que dura el proceso de prueba de Choque Térmico para las bobinas”, esta variable es afectada positivamente por el incremento en el valor de dos variables auxiliares y una constante mencionadas a continuación:

- Tiempo que dura el ciclo de las pruebas excluyendo la prueba de Choque Térmico” (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar), y
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra (constante)

En la variable auxiliar “Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Choque Térmico para las bobinas”, tiene un efecto positivo mediante el incremento en el valor de las una variable auxiliar y una constante:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Choque Térmico para las bobinas (variable
- Tiempo que descansa el empleado por cambio de ciclo de las pruebas (constante)

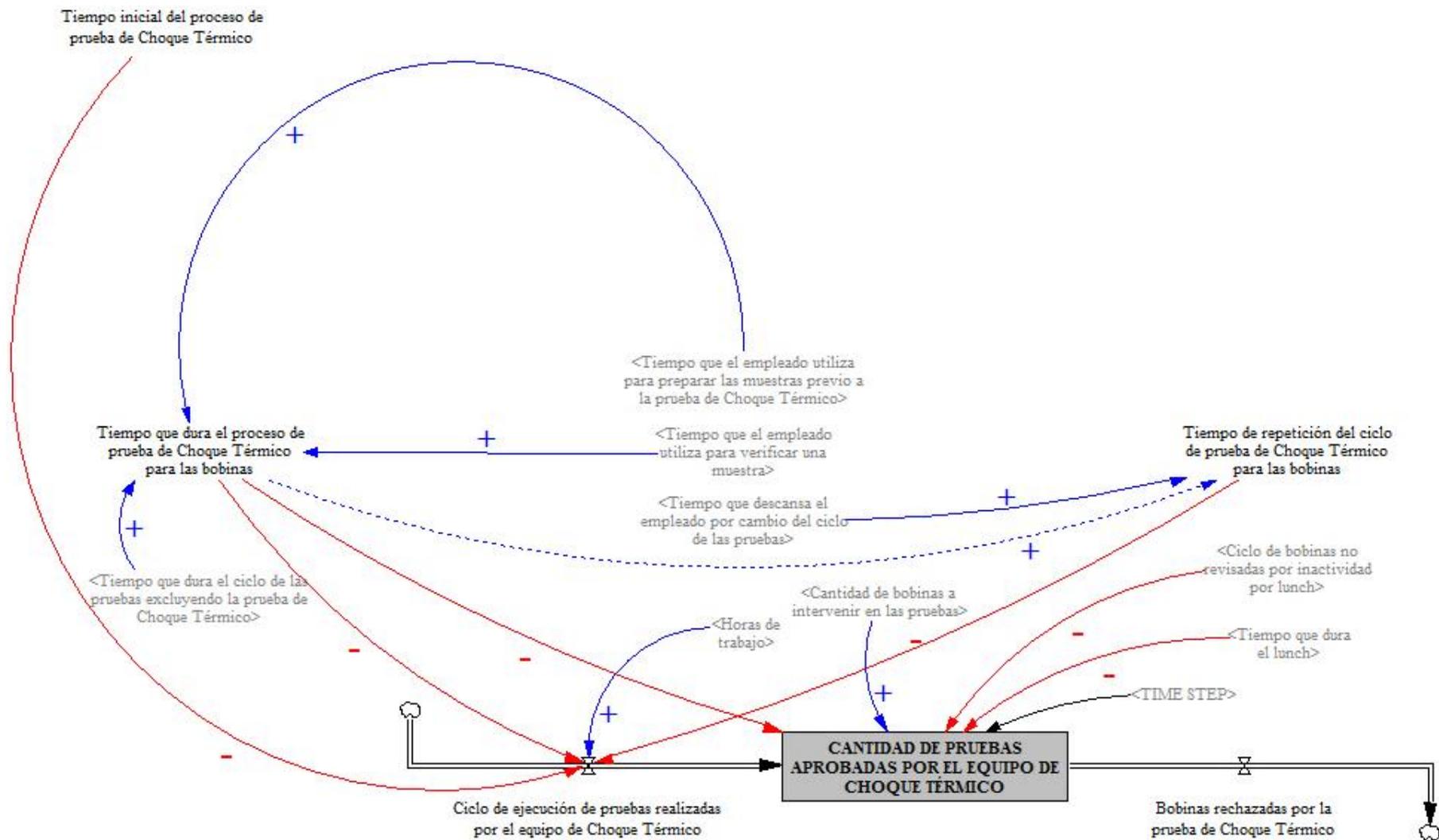


Figura 54: Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Choque Térmico
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.3. Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Resistencia de Aislamiento

Es el tercer diagrama causal del modelo actual. En la *Figura 55* se presenta el diagrama que está compuesto por una variable de nivel, dos variables de flujo, siete variables auxiliares y cinco constantes.

La variable de nivel “Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Resistencia de Aislamiento”, se refiere al número de bobinas inspeccionadas por este equipo sin considerar las defectuosas, esta variable de estado varía con la diferencia entre los valores de la variable de flujo de entrada “Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Resistencia de Aislamiento” y los valores la variable de flujo de salida “Bobinas rechazadas por la prueba de Resistencia de Aislamiento”, siendo los valores del primer flujo mayores que el segundo.

La variable de nivel previamente mencionada es afectada positivamente por el incremento en el valor de la constante “Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas”, pero afectada negativamente por el aumento en el valor de dos variables:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas (variable auxiliar)
- Ciclo de bobinas no revisadas por inactividad debido al lunch (variable auxiliar)

Esta variable de estado también tiene un efecto negativo por el incremento en el valor de la constante “Tiempo que dura el lunch” y un efecto neutro con la variación de los valores de la constante “<TIME STEP>”

Respecto a la variable de flujo de entrada, se refiere a la variación que sufre el ciclo del proceso de ejecución de la prueba de Resistencia de Aislamiento mediante alteraciones del tiempo, este ciclo sigue un patrón y tiene un efecto positivo cuando se

aumenta el valor de la variable auxiliar “Horas de trabajo”, pero un efecto negativo por el incremento en el valor de tres variables auxiliares que son:

- Tiempo inicial del proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento
- Tiempo que dura el proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas
- Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas

La variable de flujo de salida no tiene dependencia con variables auxiliares ni constantes, pero según la experiencia del supervisor encargado de la ejecución de las pruebas indica que se detectan a lo mucho cinco bobinas defectuosas por semana.

En la variable auxiliar “Tiempo inicial del proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento”, su efecto positivo se da por el aumento en el valor del “Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico”.

Respecto a la variable auxiliar “Tiempo que dura el proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas”, esta variable es afectada positivamente por el incremento en el valor del “Tiempo que dura el ciclo de las pruebas excluyendo la prueba de Choque Térmico” (variable auxiliar). En la variable auxiliar “Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas”, tiene un efecto positivo mediante el incremento en el valor de:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra (constante), y
- Tiempo que descansa el empleado por cambio de ciclo de las pruebas (constante)

4.2.3.4. Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Continuidad

Es el cuarto diagrama causal del modelo actual. En la *Figura 56* se presenta el diagrama que está compuesto por una variable de nivel, dos variables de flujo, siete variables auxiliares y seis constantes.

La variable de nivel “Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Continuidad”, se refiere al número de bobinas inspeccionadas por este equipo sin considerar las defectuosas, esta variable de estado varía con la diferencia entre los valores de la variable de flujo de entrada “Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Continuidad” y los valores la variable de flujo de salida “Bobinas rechazadas por la prueba de Continuidad”, siendo los valores del primer flujo mayores que el segundo.

La variable de nivel previamente mencionada es afectada positivamente por el incremento en el valor de la constante “Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas”, pero afectada negativamente por el aumento en el valor de dos variables auxiliares mencionadas a continuación:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Continuidad para las bobinas, y
- Ciclo de bobinas no revisadas por inactividad debido al lunch

Esta variable de estado también tiene un efecto negativo por el incremento en el valor de la constante “Tiempo que dura el lunch” y un efecto neutro con la variación de los valores de la constante “<TIME STEP>”

Respecto a la variable de flujo de entrada, se refiere a la variación que sufre el ciclo del proceso de ejecución de la prueba de Continuidad mediante alteraciones del tiempo, este ciclo sigue un patrón y tiene un efecto positivo cuando se aumenta el valor de la variable auxiliar “Horas de trabajo”, pero un efecto negativo por el incremento en el valor de tres variables auxiliares que son:

- Tiempo inicial del proceso de prueba de Continuidad
- Tiempo que dura el proceso de prueba de Continuidad para las bobinas, y
- Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Continuidad para las bobinas

La variable de flujo de salida no tiene dependencia con variables auxiliares ni constantes, pero según la experiencia del supervisor encargado de la ejecución de las pruebas indica que se detectan a lo mucho cinco bobinas defectuosas por semana.

En la variable auxiliar “Tiempo inicial del proceso de prueba de Continuidad”, su efecto positivo viene dada por el aumento en el valor de una variable auxiliar y una constante presentadas a continuación:

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar), y
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante)

Respecto a la variable auxiliar “Tiempo que dura el proceso de prueba de Continuidad para las bobinas”, esta variable es afectada positivamente por el incremento en el valor del “Tiempo que dura el ciclo de las pruebas excluyendo la prueba de Choque Térmico” (variable auxiliar), pero tiene un efecto negativo por el aumento en el valor de las dos constantes que son:

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante), y
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra (constante)

En la variable auxiliar “Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Continuidad para las bobinas”, tiene un efecto positivo mediante el incremento en el valor de las siguientes variables auxiliares y constantes:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Continuidad para las bobinas (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra (constante), y
- Tiempo que descansa el empleado por cambio de ciclo de las pruebas (constante)

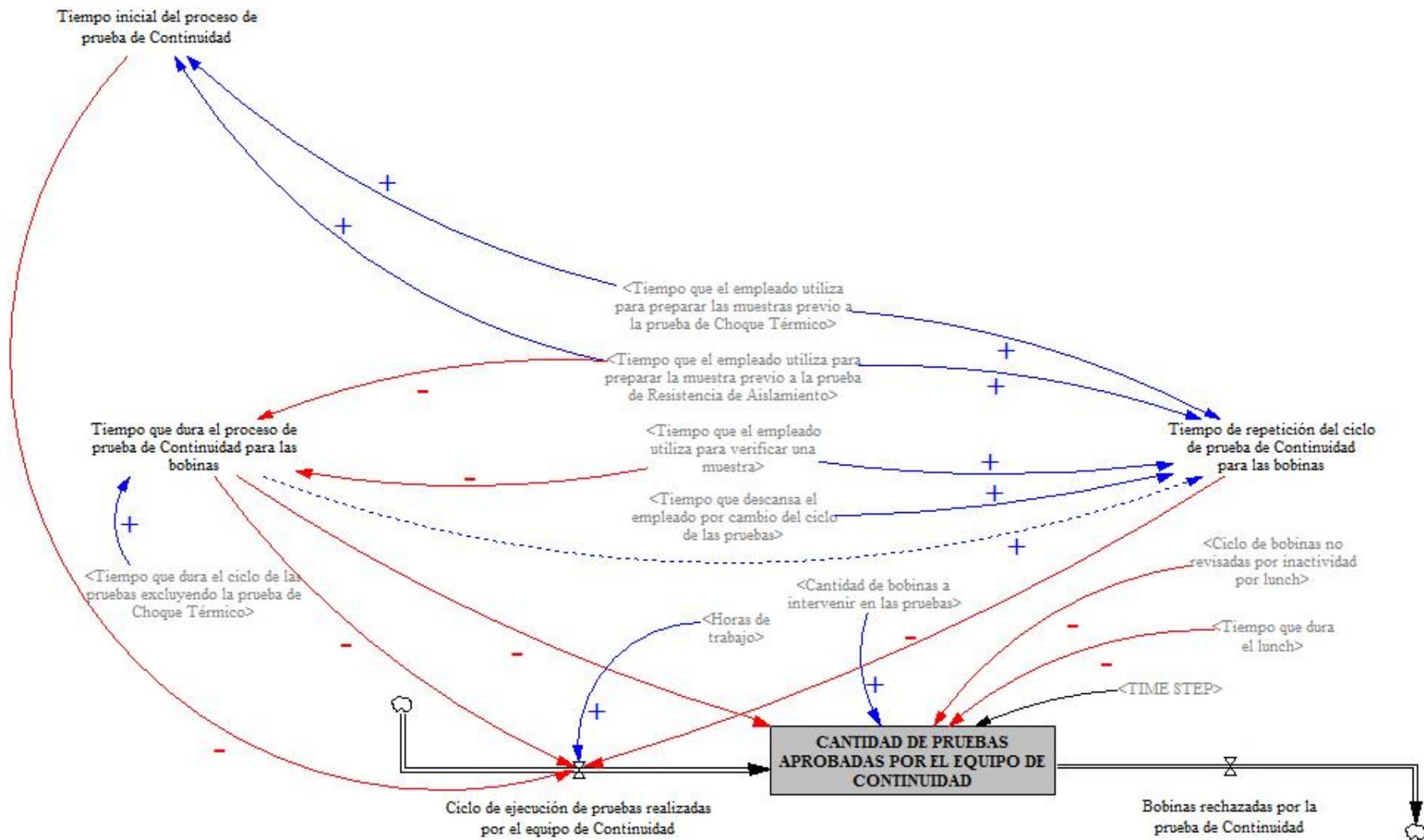


Figura 56: Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Continuidad
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.5. Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Rigidez Dieléctrica

Es el quinto diagrama causal del modelo actual. En la *Figura 57* se presenta el diagrama que está compuesto por una variable de nivel, dos variables de flujo, siete variables auxiliares y nueve constantes.

La variable de nivel “Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Rigidez Dieléctrica”, se refiere al número de bobinas inspeccionadas por este equipo sin considerar las defectuosas, esta variable de estado varía con la diferencia entre los valores de la variable de flujo de entrada “Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Rigidez Dieléctrica” y los valores la variable de flujo de salida “Bobinas rechazadas por la prueba de Rigidez Dieléctrica”, siendo los valores del primer flujo mayores que el segundo.

La variable de nivel previamente mencionada es afectada positivamente por el incremento en el valor de la constante “Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas”, pero afectada negativamente por el aumento en el valor de dos variables auxiliares mencionadas a continuación:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica para las bobinas, y
- Ciclo de bobinas no revisadas por inactividad debido al lunch

Esta variable de estado también tiene un efecto negativo por el incremento en el valor de la constante “Tiempo que dura el lunch” y un efecto neutro con la variación de los valores de la constante “<TIME STEP>”

Respecto a la variable de flujo de entrada, se refiere a la variación que sufre el ciclo del proceso de ejecución de la prueba de Rigidez Dieléctrica mediante alteraciones del tiempo, este ciclo sigue un patrón y tiene un efecto positivo cuando se aumenta el

valor de la variable auxiliar “Horas de trabajo”, pero un efecto negativo por el incremento en el valor de tres variables auxiliares que son:

- Tiempo inicial del proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica
- Tiempo que dura el proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica para las bobinas, y
- Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Rigidez Dieléctrica para las bobinas

La variable de flujo de salida no tiene dependencia con variables auxiliares ni constantes, pero según la experiencia del supervisor encargado de la ejecución de las pruebas indica que se detectan a lo mucho cinco bobinas defectuosas por semana.

En la variable auxiliar “Tiempo inicial del proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica”, su efecto positivo viene dada por el aumento en el valor de las siguientes variables auxiliares y constantes presentadas a continuación:

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Continuidad (constante)

Respecto a la variable auxiliar “Tiempo que dura el proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica para las bobinas”, esta variable es afectada positivamente por el incremento en el valor del “Tiempo que dura el ciclo de las pruebas excluyendo la prueba de Choque Térmico” (variable auxiliar), pero tiene un efecto negativo por el aumento en el valor de las siguientes constantes que son:

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante)

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Continuidad (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Diámetro (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Continuidad (constante), y
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra (constante)

En la variable auxiliar “Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Elongación para las bobinas”, tiene un efecto positivo mediante el incremento en el valor de las siguientes variables auxiliares y constantes:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica para las bobinas (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Continuidad (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Diámetro (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Continuidad (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra (constante), y
- Tiempo que descansa el empleado por cambio de ciclo de las pruebas (constante)

4.2.3.6. Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Elongación

Es el sexto diagrama causal del modelo actual. En la *Figura 58* se presenta el diagrama que está compuesto por una variable de nivel, dos variables de flujo, siete variables auxiliares y once constantes.

La variable de nivel “Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Elongación”, se refiere al número de bobinas inspeccionadas por este equipo sin considerar las defectuosas, esta variable de estado varía con la diferencia entre los valores de la variable de flujo de entrada “Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Elongación” y los valores de la variable de flujo de salida “Bobinas rechazadas por la prueba de Elongación”, siendo los valores del primer flujo mayores que el segundo.

La variable de nivel previamente mencionada es afectada positivamente por el incremento en el valor de la constante “Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas”, pero afectada negativamente por el aumento en el valor de dos variables auxiliares mencionadas a continuación:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Elongación para las bobinas, y
- Ciclo de bobinas no revisadas por inactividad debido al lunch

Esta variable de estado también tiene un efecto negativo por el incremento en el valor de la constante “Tiempo que dura el lunch” y un efecto neutro con la variación de los valores de la constante “<TIME STEP>”

Respecto a la variable de flujo de entrada, se refiere a la variación que sufre el ciclo del proceso de ejecución de la prueba de Elongación mediante alteraciones del tiempo, este ciclo sigue un patrón y tiene un efecto positivo cuando se aumenta el valor de la variable auxiliar “Horas de trabajo”, pero un efecto negativo por el incremento en el valor de tres variables auxiliares que son:

- Tiempo inicial del proceso de prueba de Elongación
- Tiempo que dura el proceso de prueba de Elongación para las bobinas, y
- Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Elongación para las bobinas

La variable de flujo de salida no tiene dependencia con variables auxiliares ni constantes, pero según la experiencia del supervisor encargado de la ejecución de las pruebas indica que se detectan a lo mucho cinco bobinas defectuosas por semana.

En la variable auxiliar “Tiempo inicial del proceso de prueba de Elongación”, su efecto positivo viene dada por el aumento en el valor de las siguientes variables auxiliares y constantes presentadas a continuación:

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Continuidad (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Rigidez Dieléctrica (constante)

Respecto a la variable auxiliar “Tiempo que dura el proceso de prueba de Elongación para las bobinas”, esta variable es afectada positivamente por el incremento en el valor del “Tiempo que dura el ciclo de las pruebas excluyendo la prueba de Choque Térmico” (variable auxiliar), pero tiene un efecto negativo por el aumento en el valor de las siguientes variables auxiliares y constantes que son:

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante)

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Continuidad (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Rigidez Dieléctrica (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Diámetro (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Rigidez Dieléctrica (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Continuidad (constante), y
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra (constante)

En la variable auxiliar “Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Elongación para las bobinas”, tiene un efecto positivo mediante el incremento en el valor de las siguientes variables auxiliares y constantes:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Elongación para las bobinas (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Continuidad (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Rigidez Dieléctrica (constante)

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Diámetro (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Rigidez Dieléctrica (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Continuidad (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra (constante), y
- Tiempo que descansa el empleado por cambio de ciclo de las pruebas (constante)

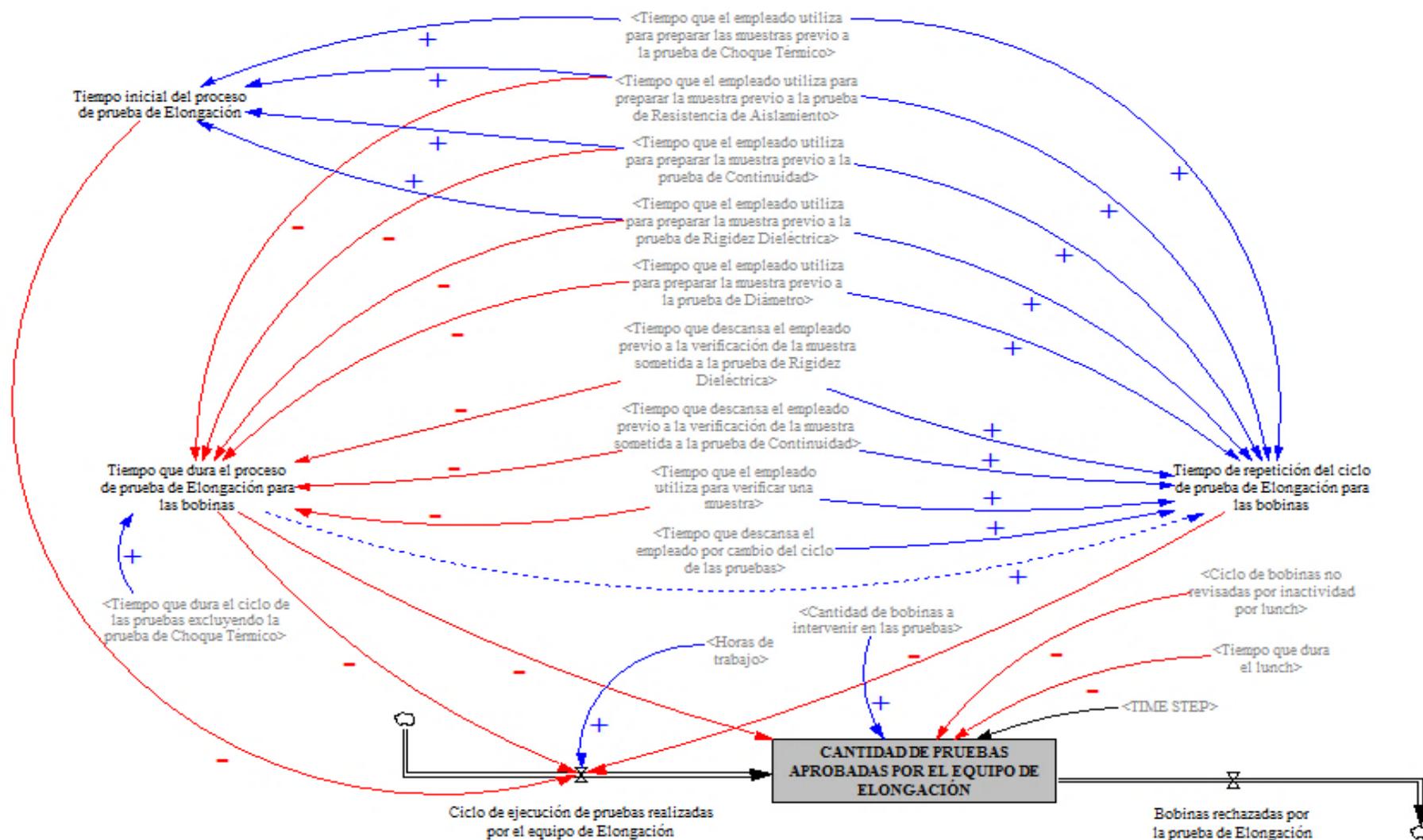


Figura 58: Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Elongación
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.7. Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Diámetro

Es el penúltimo diagrama causal del modelo actual. En la *Figura 59* se presenta el diagrama que está compuesto por una variable de nivel, dos variables de flujo, siete variables auxiliares y doce constantes.

La variable de nivel “Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Diámetro”, se refiere al número de bobinas inspeccionadas por este equipo sin considerar las defectuosas, esta variable de estado varía con la diferencia entre los valores de la variable de flujo de entrada “Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Diámetro” y los valores la variable de flujo de salida “Bobinas rechazadas por la prueba de Diámetro”, siendo los valores del primer flujo mayores que el segundo.

La variable de nivel previamente mencionada es afectada positivamente por el incremento en el valor de la constante “Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas”, pero afectada negativamente por el aumento en el valor de dos variables auxiliares mencionadas a continuación:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Diámetro para las bobinas, y
- Ciclo de bobinas no revisadas por inactividad debido al lunch

Esta variable de estado también tiene un efecto negativo por el incremento en el valor de la constante “Tiempo que dura el lunch” y un efecto neutro con la variación de los valores de la constante “<TIME STEP>”

Respecto a la variable de flujo de entrada, se refiere a la variación que sufre el ciclo del proceso de ejecución de la prueba de Diámetro mediante alteraciones del tiempo, este ciclo sigue un patrón y tiene un efecto positivo cuando se aumenta el valor de la variable auxiliar “Horas de trabajo”, pero un efecto negativo por el incremento en el valor de tres variables auxiliares que son:

- Tiempo inicial del proceso de prueba de Diámetro

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Diámetro para las bobinas, y
- Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Diámetro para las bobinas

La variable de flujo de salida no tiene dependencia con variables auxiliares ni constantes, pero según la experiencia del supervisor encargado de la ejecución de las pruebas indica que se detectan a lo mucho cinco bobinas defectuosas por semana.

En la variable auxiliar “Tiempo inicial del proceso de prueba de Diámetro”, su efecto positivo viene dada por el aumento en el valor de las siguientes variables auxiliares y constantes presentadas a continuación:

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Continuidad (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Rigidez Dieléctrica (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Elongación (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Rigidez Dieléctrica (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Elongación (constante), y
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra (constante)

Respecto a la variable auxiliar “Tiempo que dura el proceso de prueba de Diámetro para las bobinas”, esta variable es afectada positivamente por el incremento

en el valor del “Tiempo que dura el ciclo de las pruebas excluyendo la prueba de Choque Térmico” (variable auxiliar), pero tiene un efecto negativo por el aumento en el valor de las siguientes variables auxiliares y constantes que son:

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Continuidad (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Rigidez Dieléctrica (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Elongación (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Rigidez Dieléctrica (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Elongación (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Continuidad (constante), y
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra (constante)

En la variable auxiliar “Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Diámetro para las bobinas”, tiene un efecto positivo mediante el incremento en el valor de las siguientes variables auxiliares y constantes:

- Tiempo que dura el proceso de prueba de Diámetro para las bobinas (variable auxiliar)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar)

- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Resistencia de Aislamiento (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Continuidad (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Rigidez Dieléctrica (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para preparar la muestra previo a la prueba de Elongación (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Rigidez Dieléctrica (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Elongación (constante)
- Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Continuidad (constante)
- Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra (constante), y
- Tiempo que descansa el empleado por cambio de ciclo de las pruebas (constante)

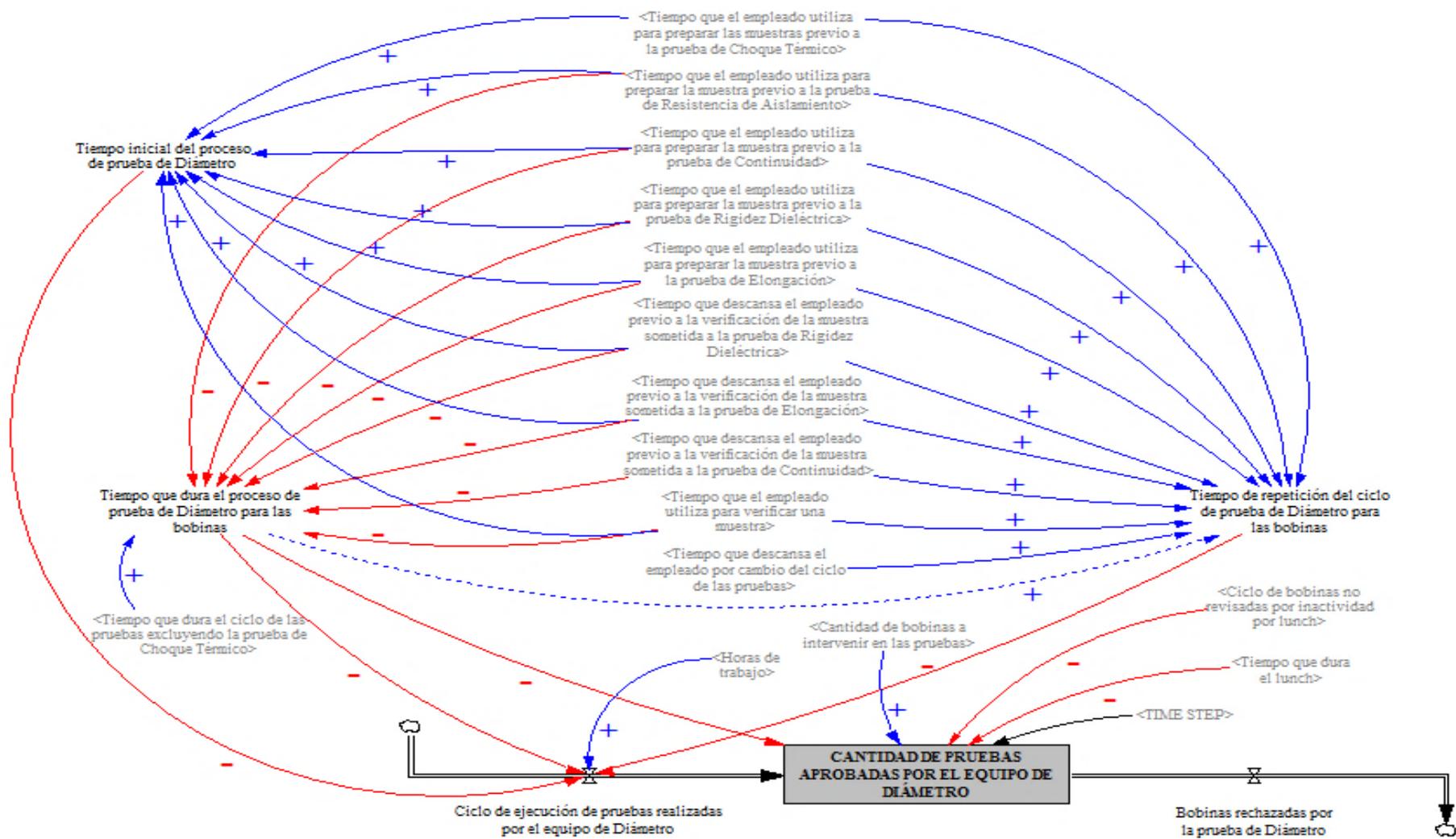


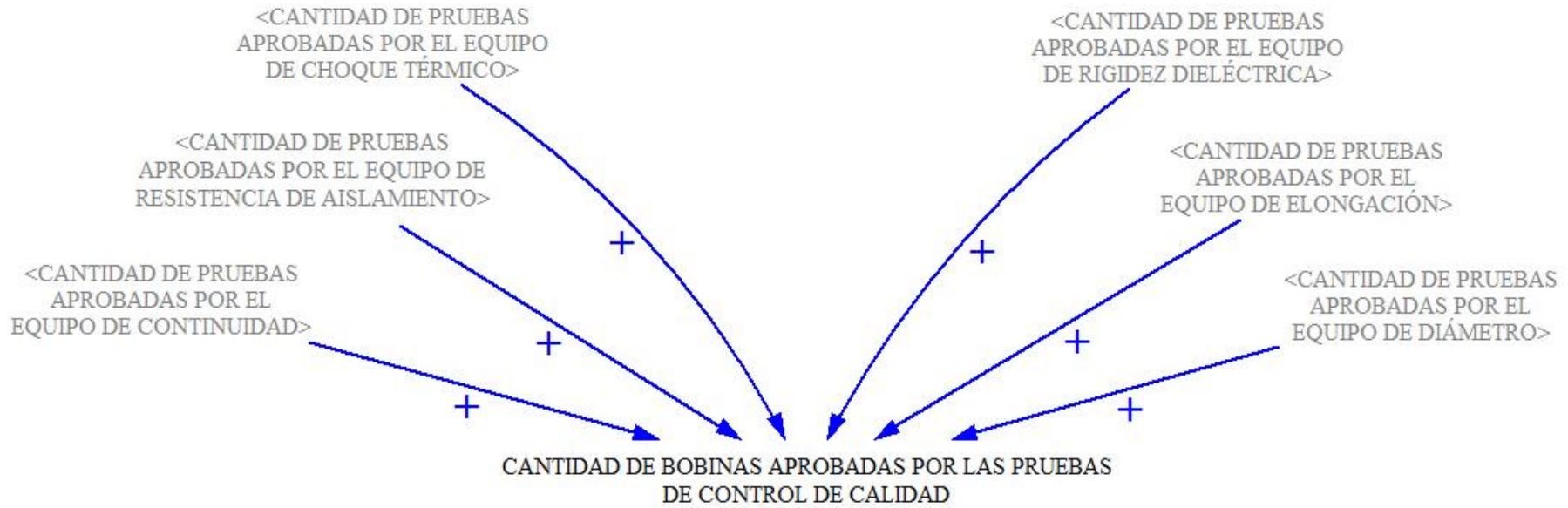
Figura 59: Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Diámetro
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.8. Diagrama causal de todos los procesos de control de calidad de bobinas

Es el último diagrama causal del modelo actual que resume todos los procesos de control de calidad (seis diagramas causales anteriores). En la *Figura 60* se presenta el diagrama que está compuesto por seis variables de nivel y una variable auxiliar.

La variable auxiliar “Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad”, se refiere al número de bobinas que son inspeccionadas en promedio por todos los equipos de pruebas sin considerar las defectuosas detectadas. Esta variable auxiliar tiene un efecto positivo mediante el incremento en el valor de las siguientes variables de nivel presentadas a continuación:

- Cantidad de pruebas realizadas por el equipo de Choque Térmico
- Cantidad de pruebas realizadas por el equipo de Resistencia de Aislamiento
- Cantidad de pruebas realizadas por el equipo de Continuidad
- Cantidad de pruebas realizadas por el equipo de Rigidez Dieléctrica
- Cantidad de pruebas realizadas por el equipo de Choque Elongación, y
- Cantidad de pruebas realizadas por el equipo de Diámetro



NOTA: Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas ES DE 3 BOBINAS ACTUALMENTE

Model created for improving quality control processes of coils; Created by: Miguel Ángel Escudero Ramirez. (ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL) - 2016; To: ELECTROCABLES C.A. (Ecuador - Guayas - Guayaquil).

Figura 60: Diagrama causal de todos los procesos de control de calidad de bobinas
Fuente: Elaboración propia

4.3. PROGRAMACIÓN DEL MODELO ACTUAL POR COMPUTADORA

Para la programación del modelo actual se utiliza como software el Vensim PLE Plus para Windows versión 6.3 (x32), es un software para la simulación dinámica de sistemas. (Véase *Figura 61*)

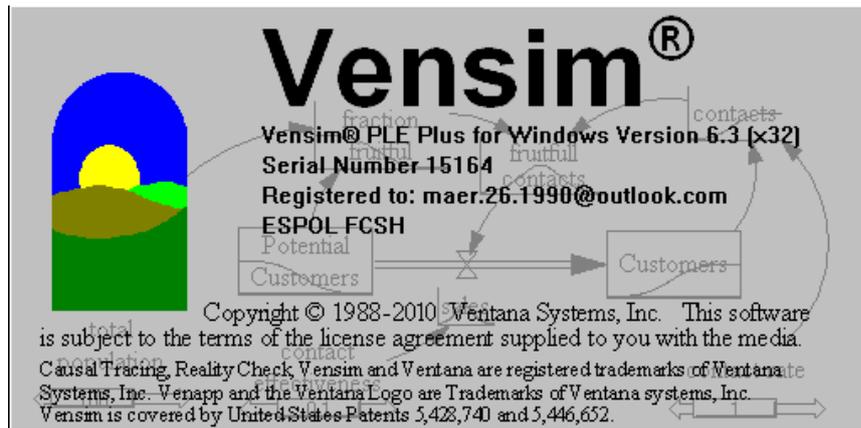


Figura 61: Vensim PLE Plus
Fuente: (Vensim)

4.4. CALIBRADO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO ACTUAL

4.4.1. Calibrado

<p>(C_l) [Minuto] = 30; $30 \leq (C_l) \leq 60$ (C_t) [minuto] = 13440; $480 \leq (C_t) \leq 13440$ (C_b) [Bobina] = 3; $1 \leq (C_b) \leq 6$ (C_v) [Minuto/Bobina] = 0,17; $0,17 \leq (C_v) \leq 5$ (C_d) [Minuto] = 28,85; $0 \leq (C_d) \leq 180$ (C_CH-T-m) [Minuto/Bobina] = 5,17; $5,17 \leq (C_{CH-T-m}) \leq 5,20$ (C_R-A-m) [Minuto/Bobina] = 1,75; $0,94 \leq (C_{R-A-m}) \leq 8,87$ (C_C-m) [Minuto/Bobina] = 0,83; $0,64 \leq (C_{C-m}) \leq 1,31$ (C_R-D-m) [Minuto/Bobina] = 0,72; $0,41 \leq (C_{R-D-m}) \leq 1,92$ (C_E-m) [Minuto/Bobina] = 0,46; $0,38 \leq (C_{E-m}) \leq 0,79$ (C_D-m) [Minuto/Bobina] = 2,22; $2,15 \leq (C_{D-m}) \leq 2,36$ (C_C-d) [Minuto/Bobina] = 3,01; $0 \leq (C_{C-d}) \leq 12,19$ (C_R-D-d) [Minuto/Bobina] = 1,34; $0 \leq (C_{R-D-d}) \leq 1,34$ (C_E-d) [Minuto/Bobina] = 0,63; $0 \leq (C_{E-d}) \leq 0,63$ (C_CH-T-i) [Minuto] = 0; (C_CH-T-I) = {0}</p>
<p>Tabla 20: Listado de Constantes involucradas en el modelo actual con sus respectivos valores asignados</p>
<p>Fuente: Elaboración propia</p>

4.4.2. Análisis de sensibilidad

Una forma de realizar el análisis de sensibilidad en Vensim es mediante la configuración de la sensibilidad de la simulación presentada en la *Figura 62*.

En la *Figura 62* observa que el número de simulaciones fue 200, con ruido (Noise Seed = 1234) y el método seleccionado para dichas simulaciones fue el Multivariado o también llamado Montecarlo.

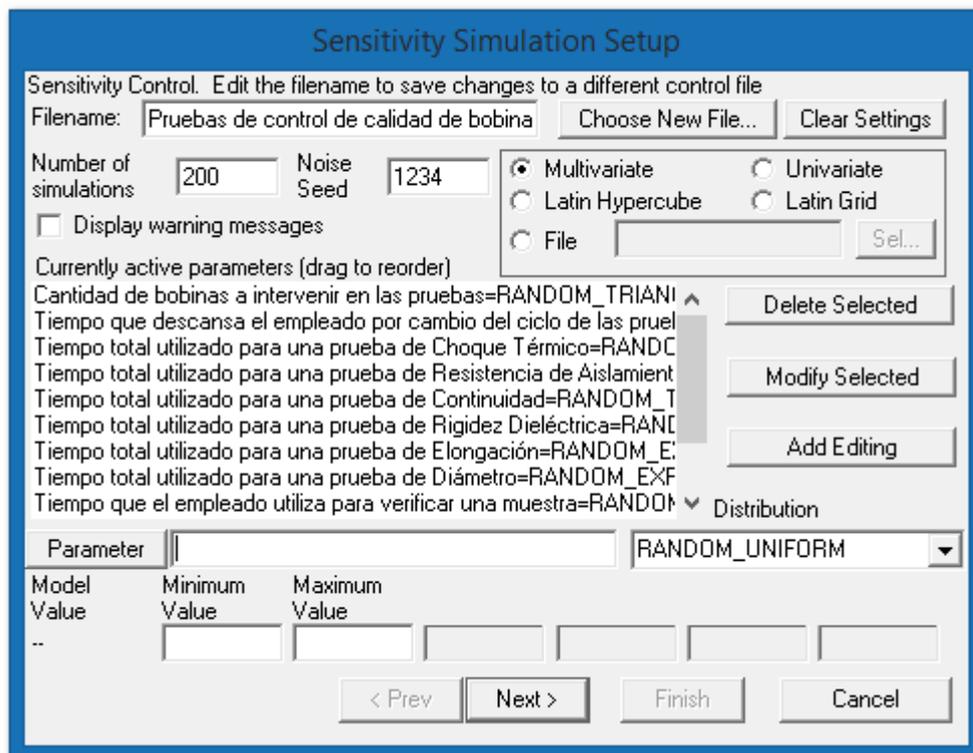


Figura 62: Ventana para la configuración de la sensibilidad de la simulación
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los parámetros o constantes de entrada con sus respectivas distribuciones y valores para la ejecución del análisis de sensibilidad:

RANDOM TRIANGULAR ({min} , {max} , {start} , {peak} , {stop} , {seed}) RANDOM TRIANGULAR (3 , 6 , 3 , 3 , 6 , 1234)
<i>Ecuación 1: Parámetro “Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas” con distribución Triangular</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>
RANDOM NORMAL ({min} , {max} , {mean} , {stdev} , {seed}) RANDOM NORMAL (0 , 57.6996 , 28.8498 , 14.4249 , 1234)
<i>Ecuación 2: Parámetro “Tiempo que descansa el empleado por cambio del ciclo de las pruebas” con distribución Normal</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>
RANDOM TRIANGULAR ({min} , {max} , {start} , {peak} , {stop} , {seed}) RANDOM TRIANGULAR (35.1654 , 35.2018 , 35.1654 , 35.1654 , 35.2018 , 1234)
<i>Ecuación 3: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Choque Térmico” con distribución Triangular</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>
RANDOM EXPONENTIAL ({min} , {max} , {shift} , {stretch} , {seed}) RANDOM EXPONENTIAL (10.3498 , 18.3 , 10.3498 , 0.8083 , 1234)
<i>Ecuación 4: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Resistencia de Aislamiento” con distribución Exponencial</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>
RANDOM TRIANGULAR ({min} , {max} , {start} , {peak} , {stop} , {seed}) RANDOM TRIANGULAR (9.35 , 10.0818 , 9.35 , 9.35 , 10.0818 , 1234)
<i>Ecuación 5: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Continuidad” con distribución Triangular</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>
RANDOM GAMMA ({min} , {max} , {Order} , {shift} , {stretch} , {seed}) RANDOM GAMMA (1.5144 , 4.52 , 17.059 , 1.5144 , 0.1056 , 1234)
<i>Ecuación 6: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Rigidez Dieléctrica” con distribución Gamma</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>
RANDOM EXPONENTIAL ({min} , {max} , {shift} , {stretch} , {seed}) RANDOM EXPONENTIAL (1.0081 , 1.42 , 1.0081 , 0.08 , 1234)
<i>Ecuación 7: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Elongación” con distribución Exponencial</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>
RANDOM EXPONENTIAL ({min} , {max} , {shift} , {stretch} , {seed}) RANDOM EXPONENTIAL (2.1483 , 2.36 , 2.1483 , 0.0675 , 1234)
<i>Ecuación 8: Parámetro “Tiempo total utilizado para una prueba de Diámetro” con distribución Exponencial</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>
RANDOM UNIFORM ({min} , {max} , {seed}) RANDOM UNIFORM (0.166667 , 5 , 1234)
<i>Ecuación 9: Parámetro “Tiempo que el empleado utiliza para verificar una muestra” con distribución Uniforme</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>

RANDOM UNIFORM ({min} , {max} , {seed})
RANDOM UNIFORM (0 , 12.19 , 1234)
<i>Ecuación 10: Parámetro “Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Continuidad” con distribución Uniforme</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>

RANDOM UNIFORM ({min} , {max} , {seed})
RANDOM UNIFORM (0 , 1.34467 , 1234)
<i>Ecuación 11: Parámetro “Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Rigidez Dieléctrica” con distribución Uniforme</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>

RANDOM UNIFORM ({min} , {max} , {seed})
RANDOM UNIFORM (0 , 0.629667 , 1234)
<i>Ecuación 12: Parámetro “Tiempo que descansa el empleado previo a la verificación de la muestra sometida a la prueba de Elongación” con distribución Uniforme</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>

RANDOM TRIANGULAR ({min} , {max} , {start} , {peak} , {stop} , {seed})
RANDOM TRIANGULAR (30 , 60 , 30 , 30 , 60 , 1234)
<i>Ecuación 13: Parámetro “Tiempo que dura el lunch” con distribución Triangular</i>
<i>Fuente: Elaboración propia</i>

En los gráficos de sensibilidad presentados en las *Figura 63* y *Figura 64* de la variable auxiliar “Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad”, se concluye que en el minuto = 3360 (una semana) y a un nivel de confianza del 95% se obtiene un intervalo máximo comprendido entre 55 a 140 bobinas en promedio, en cambio a un nivel de confianza del 75% sea tiene un intervalo entre 67 a 113 bobinas para en minuto = 3360.

En los gráficos de sensibilidad mostrados en las *Figura 65* y *Figura 66* de la constante “Cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas”, se afirma que en cualquier tiempo y a un nivel de confianza del 95% se obtiene un intervalo comprendido entre 3 a 5 bobinas en promedio.

En los gráficos de sensibilidad mostrados en las *Figura 67* y *Figura 68* de la constante “Tiempo que descansa el empleado por cambio del ciclo de las pruebas”, se concluye que en cualquier tiempo y a un nivel de confianza del 95% se obtiene un intervalo comprendido entre 5 a 51 minutos en promedio, por otro lado, a un nivel de confianza es del 75% el intervalo está entre 12,5 y 42,5 minutos en promedio.

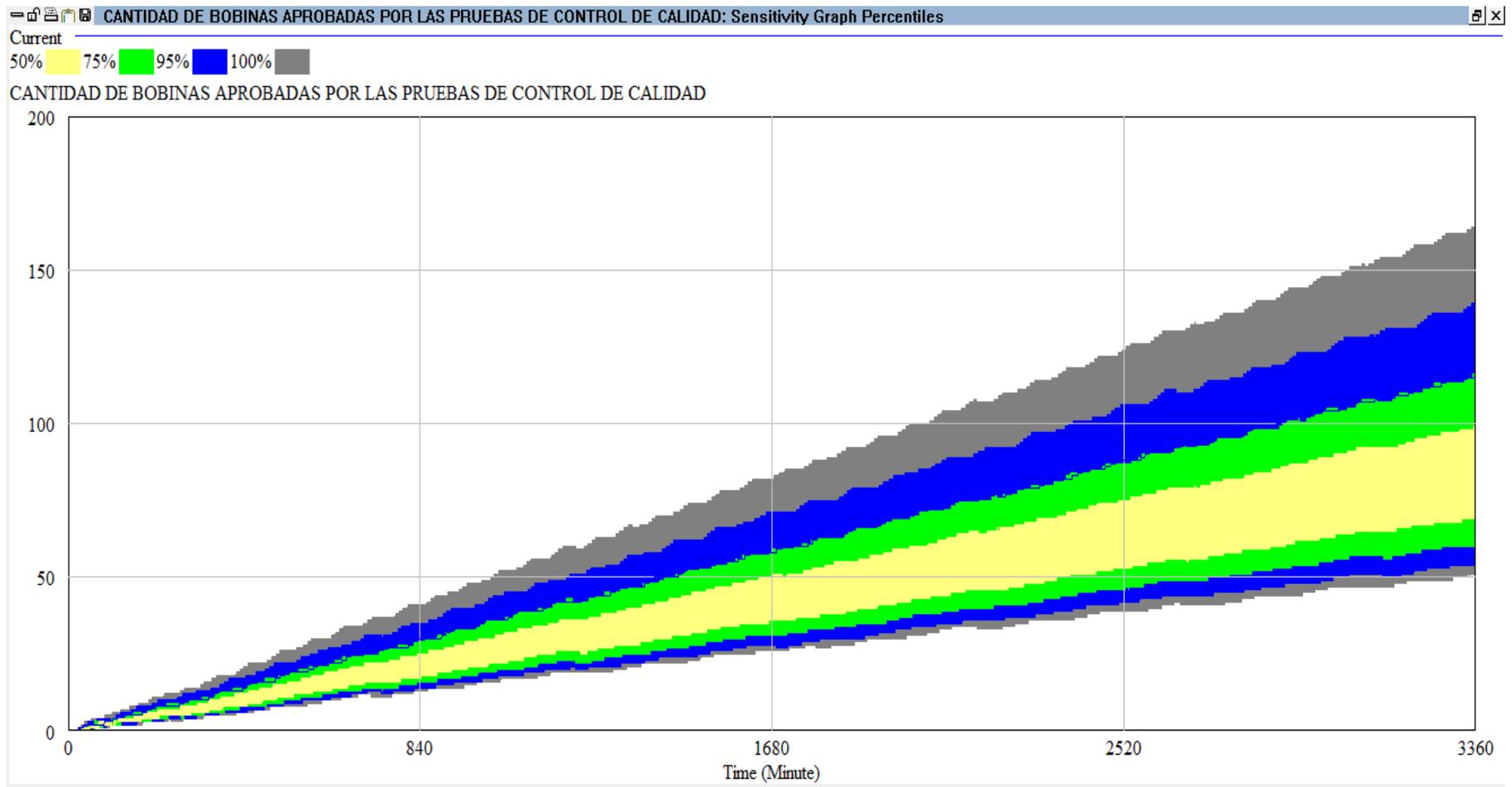


Figura 63: Gráfico de sensibilidad de cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad
Fuente: Elaboración propia

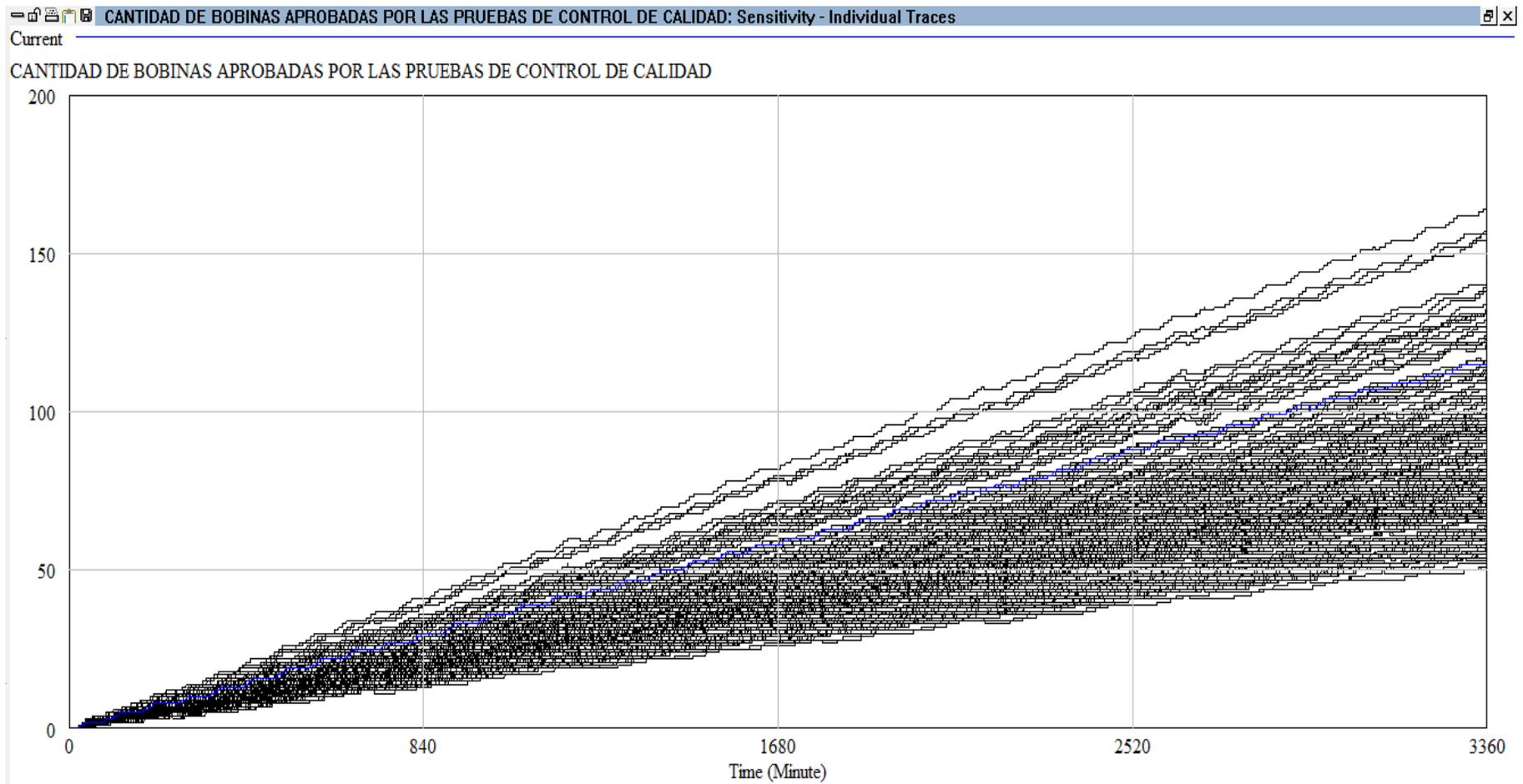


Figura 64: Gráfico de sensibilidad (trayectorias individuales) de cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad
Fuente: Elaboración propia

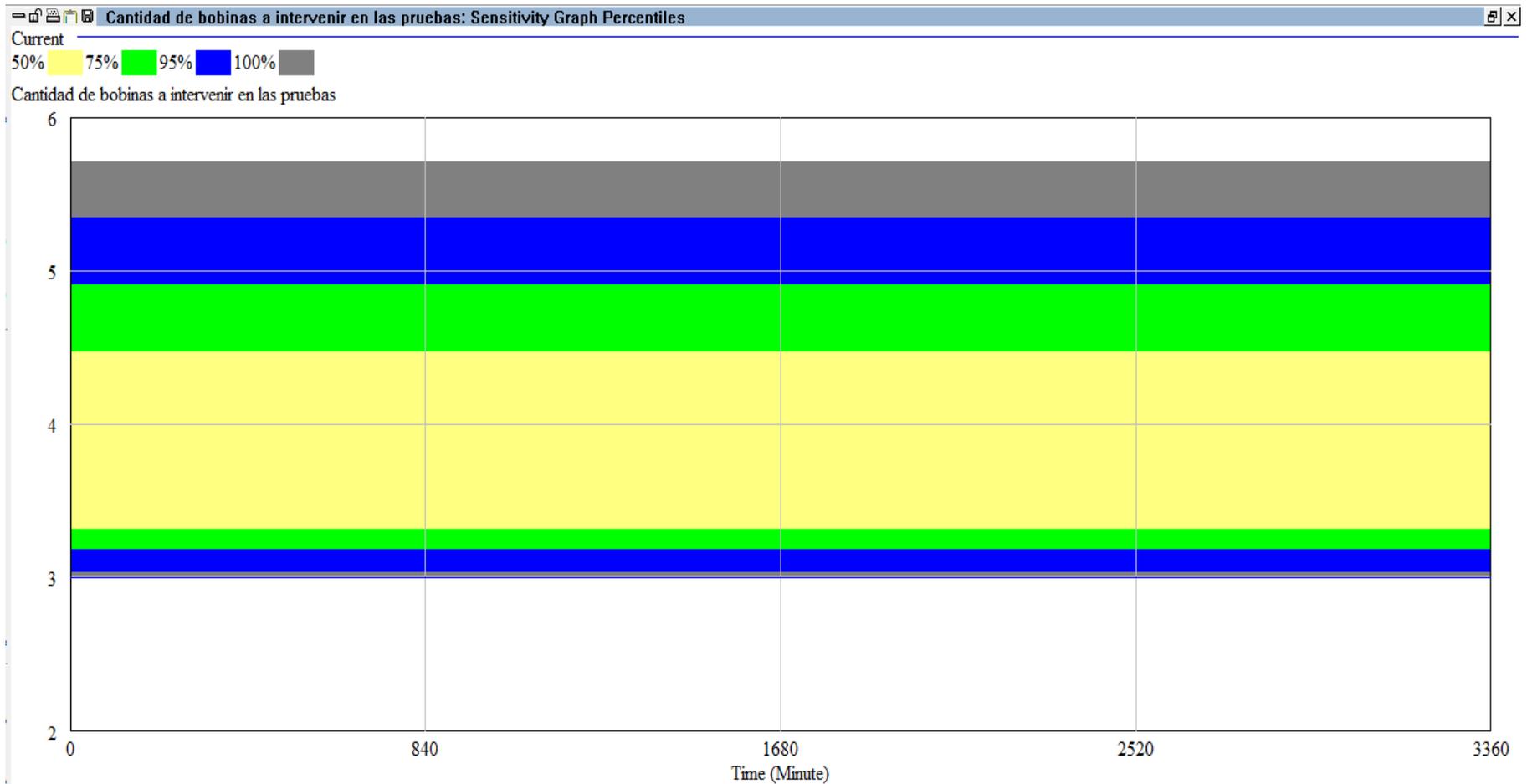


Figura 65: Gráfico de sensibilidad de cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas

Fuente: Elaboración propia

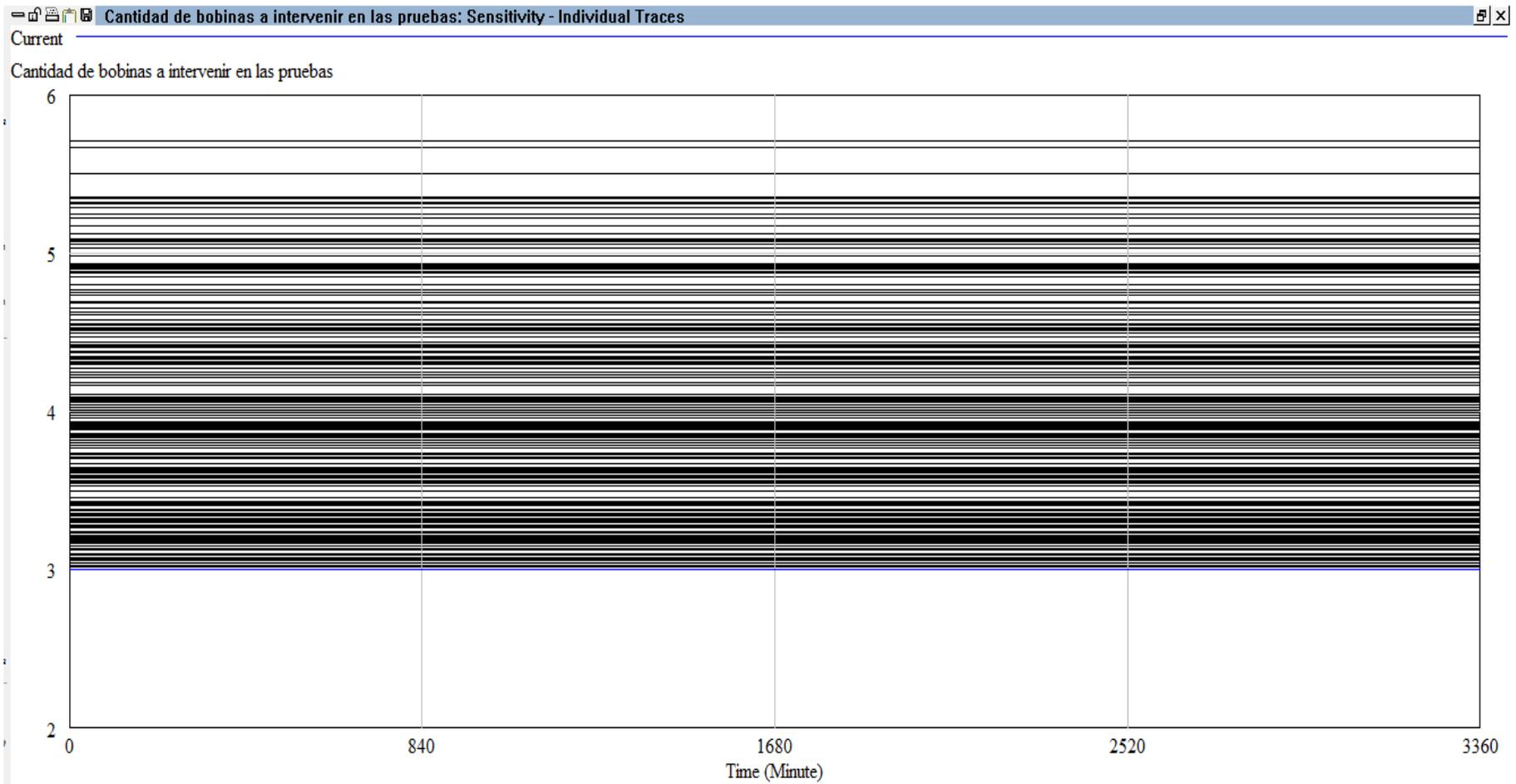


Figura 66: Gráfico de sensibilidad (trayectorias individuales) de cantidad de bobinas a intervenir en las pruebas
Fuente: Elaboración propia

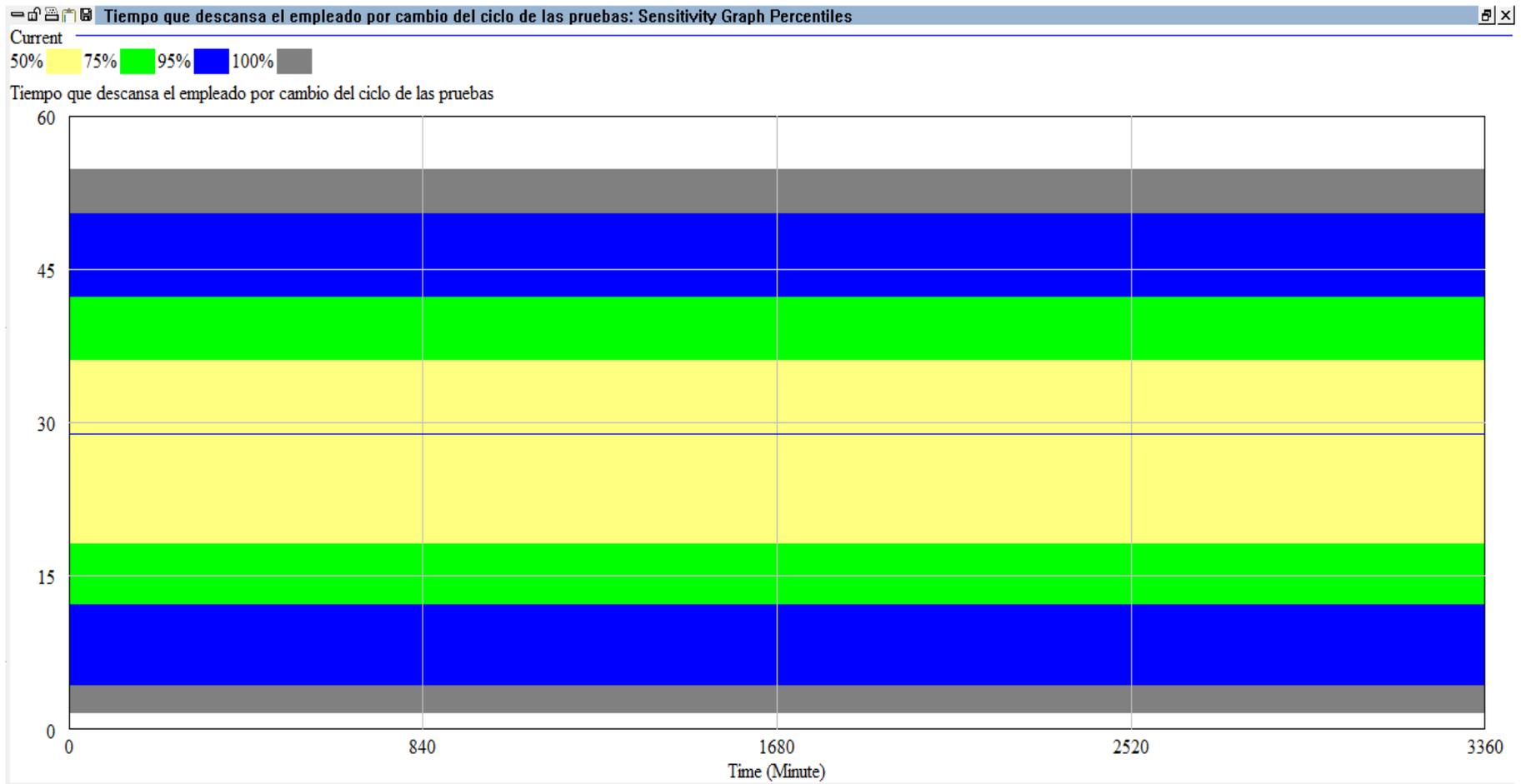


Figura 67: Gráfico de sensibilidad tiempo que descansa el empleado por cambio de ciclo de las pruebas

Fuente: Elaboración propia

Current

Tiempo que descansa el empleado por cambio del ciclo de las pruebas

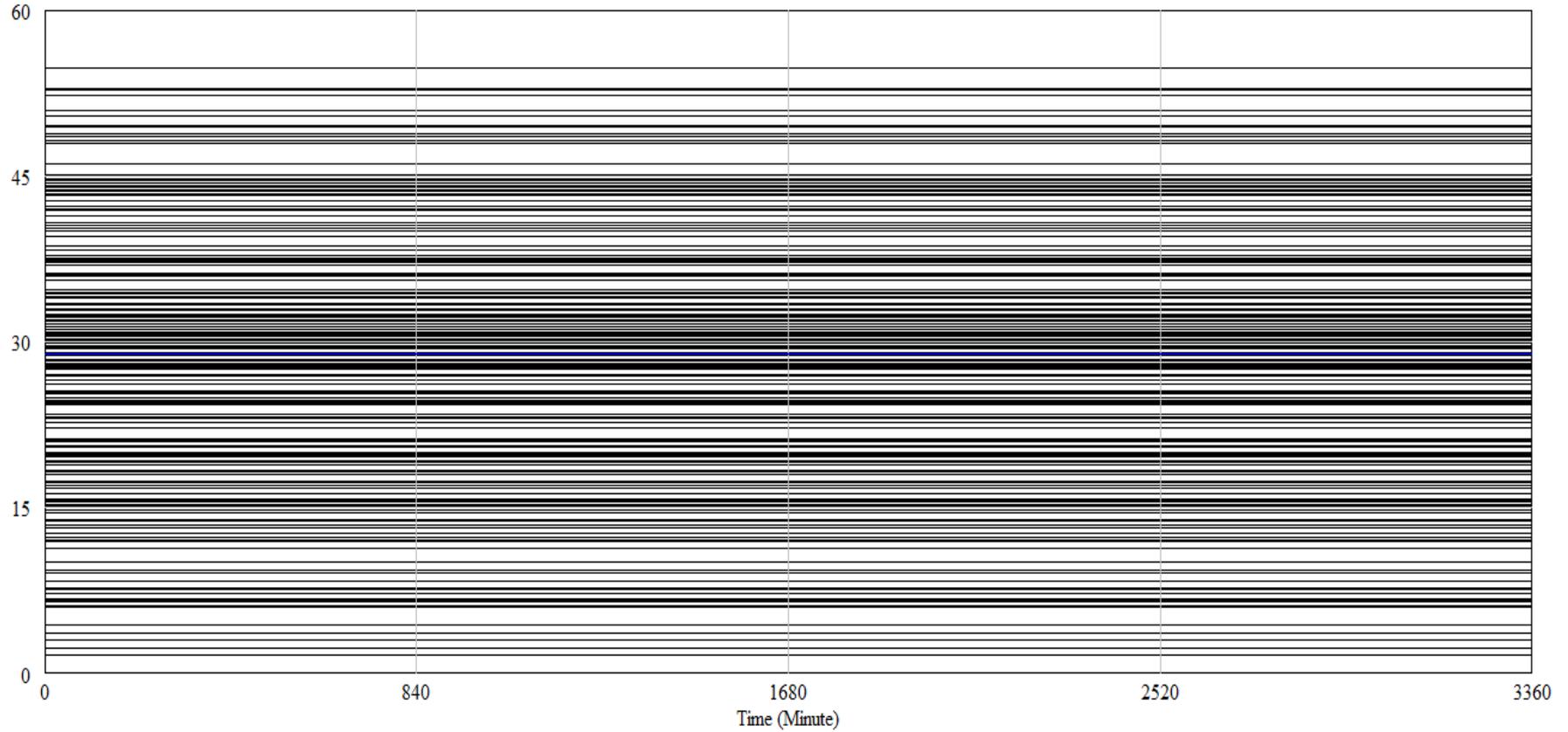


Figura 68: Gráfico de sensibilidad (trayectorias individuales) tiempo que descansa el empleado por cambio de ciclo de las pruebas

Fuente: Elaboración propia

4.5. VALIDACIÓN DEL MODELO ACTUAL

Para una mejor comprensión de las ecuaciones en cuanto a su nomenclatura se refiere, es necesario hacer uso de los nombres asignados a cada tipo de variables y constantes mostrados en la *Tabla 1*, *Tabla 2* y *Tabla 3*, que se encuentran en este documento en la sección 3.3.2. que trata sobre el tópico de *Identificación de las relaciones causa-efecto entre las variables*.

Las reglas y/o ecuaciones de la primera parte del modelo como se muestra en *Figura 53* se describen a continuación de la siguiente manera:

$$(A_I) = \text{PULSE TRAIN}(240, (C_I), 480, (C_t))$$

Ecuación 14: Ciclo de bobinas no revisadas debido al lunch (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_I) = (C_t) / 60$$

Ecuación 15: Horas de trabajo (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_CH-T-m) = (C_b) * (C_CH-T-m)$$

Ecuación 16: Tiempo que el empleado utiliza para preparar las muestras previo a la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_c) = (C_b) * ((C_R-A-m) + (C_C-m) + (C_R-A-m) + (C_R-D-m) + (C_E-m) + (C_D-m) + (C_E-d) + (C_R-D-d) + (C_C-d) + 4 * (C_v))$$

Ecuación 17: Tiempo que dura el ciclo de las pruebas excluyendo la prueba de Choque Térmico (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

Las reglas y/o ecuaciones de la segunda parte del modelo como se muestra en

Figura 54 se describen a continuación de la siguiente manera:

$$(A_CH-T-p) = (A_c) + (A_CH-T-m) + (C_v)$$

Ecuación 18: Tiempo que dura el proceso de prueba de Choque Térmico para las bobinas (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_CH-T-c) = (A_CH-T-p) + (C_d)$$

Ecuación 19: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Choque Térmico para las bobinas (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(F-E_{CH-T}) = \text{PULSE TRAIN} ((C_{CH-T-i}), (A_{CH-T-p}), (A_{CH-T-c}), (A_h) * 60)$$

Ecuación 20: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Choque Térmico (variable de flujo)

Fuente: Elaboración propia

$$(N_{CH-T}) = (((C_b) * (F-E_{CH-T})) / (A_{CH-T-p})) - (1/(C_{ts})) * (F-S_{CH-T}) - (A_l) / (C_l)$$

Ecuación 21: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Choque Térmico (variable de nivel)

Fuente: Elaboración propia

Las reglas y/o ecuaciones de la tercera parte del modelo como se muestra en

Figura 55 se describen a continuación de la siguiente manera:

$$(A_{R-A-i}) = (A_{CH-T-m})$$

Ecuación 22: Tiempo inicial del proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_{R-A-p}) = (A_c)$$

Ecuación 23: Tiempo que dura el proceso de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_{R-A-c}) = (A_{R-A-p}) + 1 * (C_v) + (C_d) + (A_{CH-T-m})$$

Ecuación 24: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Resistencia de Aislamiento para las bobinas (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(F-E_{R-A}) = \text{PULSE TRAIN} ((C_{R-A-i}), (A_{R-A-p}), (A_{R-A-c}), (A_h) * 60)$$

Ecuación 25: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Resistencia de Aislamiento (variable de flujo)

Fuente: Elaboración propia

$$(N_{R-A}) = (((C_b) * (F-E_{R-A})) / (A_{R-A-p})) - (1/(C_{ts})) * (F-S_{R-A}) - (A_l) / (C_l)$$

Ecuación 26: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Resistencia de Aislamiento (variable de nivel)

Fuente: Elaboración propia

Las reglas y/o ecuaciones de la cuarta parte del modelo como se muestra en

Figura 56 se describen a continuación de la siguiente manera:

$$(A_{C-i}) = (A_{CH-T-m}) + (C_{R-A-m})$$

Ecuación 27: Tiempo inicial del proceso de prueba de Continuidad (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_C-p) = (A_c) - ((C_R-A-m) + (C_v))$$

Ecuación 28: Tiempo que dura el proceso de prueba de Continuidad para las bobinas (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_C-c) = (A_C-p) + 2 * (C_v) + (C_d) + (A_CH-T-m) + (C_R-A-m)$$

Ecuación 29: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Continuidad para las bobinas (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(F-E_C) = \text{PULSE TRAIN} ((C_C-i), (A_C-p), (A_C-c), (A_h) * 60)$$

Ecuación 30: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Continuidad (variable de flujo)

Fuente: Elaboración propia

$$(N_C) = (((C_b) * (F-E_C)) / (A_C-p)) - (1/(C_ts)) * (F-S_C) - (A_l) / (C_l)$$

Ecuación 31: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Continuidad (variable de nivel)

Fuente: Elaboración propia

Las reglas y/o ecuaciones de la quinta parte del modelo como se muestra en

Figura 57 se describen a continuación de la siguiente manera:

$$(A_R-D-i) = (A_CH-T-m) + (C_R-A-m) + (C_C-m)$$

Ecuación 32: Tiempo inicial del proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_R-D-p) = (A_c) - ((C_R-A-m) + (C_C-m) + (C_D-m) + (C_C-d) + 2 * (C_v))$$

Ecuación 33: Tiempo que dura el proceso de prueba de Rigidez Dieléctrica para las bobinas (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_R-D-c) = (A_R-D-p) + 3 * (C_v) + (C_d) + (A_CH-T-m) + (C_R-A-m) + (C_C-m) + (C_D-m) + (C_C-d)$$

Ecuación 34: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Rigidez Dieléctrica para las bobinas (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(F-E_R-D) = \text{PULSE TRAIN} ((C_R-D-i), (A_R-D-p), (A_R-D-c), (A_h) * 60)$$

Ecuación 35: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Rigidez Dieléctrica (variable de flujo)

Fuente: Elaboración propia

$$(N_R-D) = (((C_b) * (F-E_R-D)) / (A_R-D-p)) - (1/(C_ts)) * (F-S_R-D) - (A_l) / (C_l)$$

Ecuación 36: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Rigidez Dieléctrica (variable de nivel)

Fuente: Elaboración propia

Las reglas y/o ecuaciones de la sexta parte del modelo como se muestra en *Figura*

58 se describen a continuación de la siguiente manera:

$$(A_E-i) = (A_CH-T-m) + (C_R-A-m) + (C_C-m) + (C_R-D-m)$$

Ecuación 37: Tiempo inicial del proceso de prueba de Elongación (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_E-p) = (A_c) - ((C_R-A-m) + (C_C-m) + (C_R-D-m) + (C_D-m) + (C_R-D-d) + (C_C-d) + 3 * (C_v))$$

Ecuación 38: Tiempo que dura el proceso de prueba de Elongación para las bobinas (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_E-c) = (A_E-p) + ((C_R-D-d) + (C_C-d)) + 4 * (C_v) + (C_d) + ((C_D-m) + (A_CH-T-m) + (C_R-A-m) + (C_C-m) + (C_R-D-m))$$

Ecuación 39: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Elongación para las bobinas (variable auxiliar)

$$(F-E_E) = \text{PULSE TRAIN} ((C_E-i), (A_E-p), (A_E-c), (A_h) * 60)$$

Ecuación 40: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Elongación (variable de flujo)

Fuente: Elaboración propia

$$(N_E) = (((C_b) * (F-E_E)) / (A_E-p)) - (1/(C_ts)) * (F-S_E) - (A_l) / (C_l)$$

Ecuación 41: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Elongación (variable de nivel)

Fuente: Elaboración propia

Las reglas y/o ecuaciones de la séptima parte del modelo como se muestra en

Figura 59 se describen a continuación de la siguiente manera:

$$(A_D-i) = (A_CH-T-m) + ((C_R-A-m) + (C_C-m) + (C_R-D-m) + (C_E-m)) + 2 * (C_v) + ((C_R-D-d) + C_E-d)$$

Ecuación 42: Tiempo inicial del proceso de prueba de Diámetro (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_D-p) = (A_c) - ((C_R-A-m) + (C_C-m) + (C_R-D-m) + (C_E-m)) + ((C_E-d) + (C_R-D-d) + (C_C-d)) + 4 * (C_v)$$

Ecuación 43: Tiempo que dura el proceso de prueba de Diámetro para las bobinas (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(A_D-c) = (A_D-p) + ((C_R-D-d) + (C_E-d) + (C_C-d)) + 5 * (C_v) + (C_d) + ((A_CH-T-m) + (C_R-A-m) + (C_C-m) + (C_R-D-m) + (C_E-m))$$

Ecuación 44: Tiempo de repetición del ciclo de prueba de Diámetro para las bobinas (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

$$(F-E_D) = \text{PULSE TRAIN} ((C_D-i), (A_D-p), (A_D-c), (A_h) * 60)$$

Ecuación 45: Ciclo de ejecución de pruebas realizadas por el equipo de Diámetro (variable de flujo)

Fuente: Elaboración propia

$$(N_D) = (((C_b) * (F-E_D)) / (A_D-p)) - (1/(C_ts)) * (F-S_D) - (A_l) / (C_l)$$

Ecuación 46: Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Diámetro (variable de nivel)

Fuente: Elaboración propia

Las reglas y/o ecuaciones de la última parte del modelo como se muestra en

Figura 60 se describen a continuación de la siguiente manera:

$$(A_C-C) = \text{IF THEN ELSE} (((N_{CH-T}) + (N_{R-A}) + (N_C) + (N_{R-D}) + (N_E) + (N_D)) / 6 - \text{INTEGER} (((N_{CH-T}) + (N_{R-A}) + (N_C) + (N_{R-D}) + (N_E) + (N_D)) / 6) \geq 0.9, \text{INTEGER} (((N_{CH-T}) + (N_{R-A}) + (N_C) + (N_{R-D}) + (N_E) + (N_D)) / 6) + 1, \text{INTEGER} (((N_{CH-T}) + (N_{R-A}) + (N_C) + (N_{R-D}) + (N_E) + (N_D)) / 6))$$

Ecuación 47: Cantidad de bobinas inspeccionadas por las pruebas de control de calidad (variable auxiliar)

Fuente: Elaboración propia

4.6. PROPUESTA PARA EL MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS A PARTIR DEL MODELO ACTUAL

4.6.1. Diseño optimizado del modelo mediante la aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones (S-DBR)

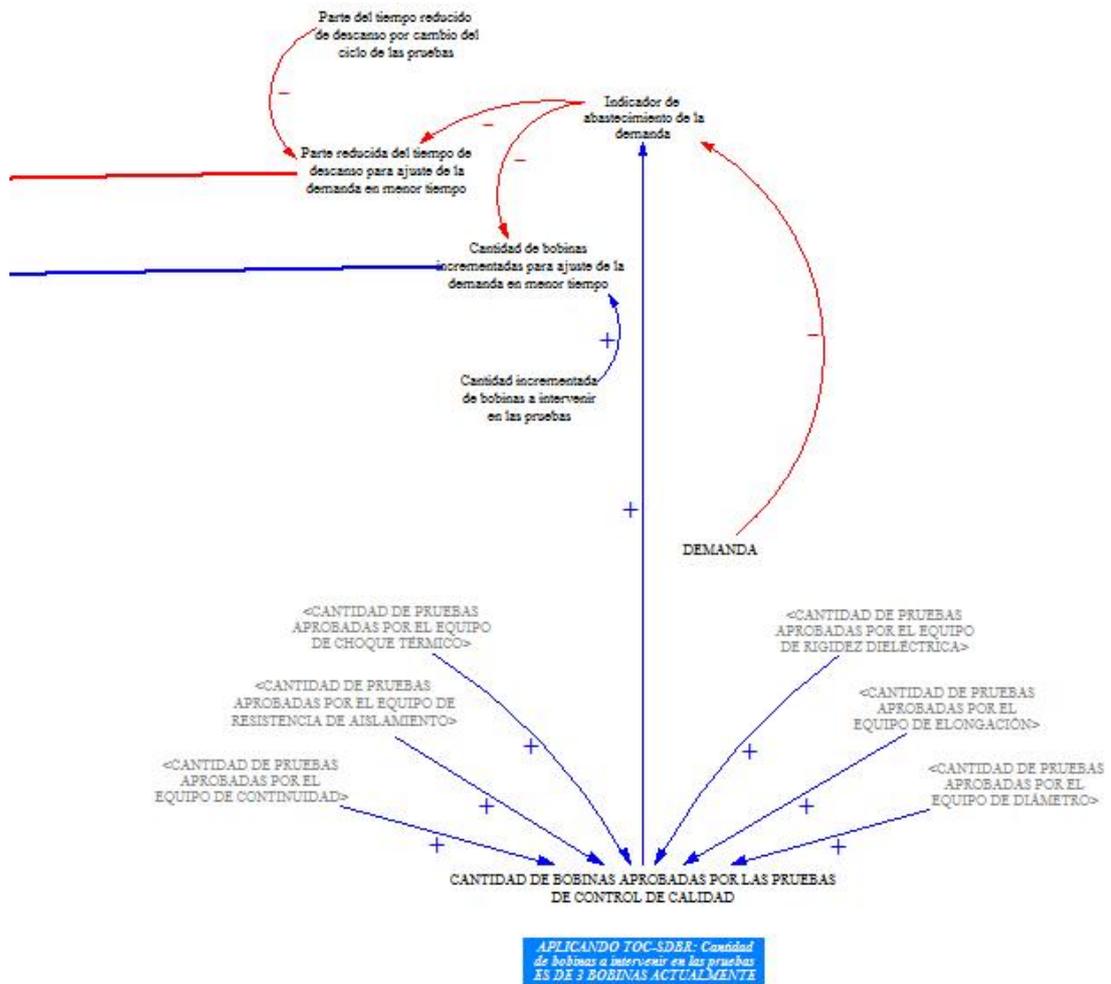


Figura 69: Sección del modelo completo y optimizado donde se controla el ritmo de trabajo para el mejoramiento de los procesos mediante aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones (S-DBR)

Fuente: Elaboración propia

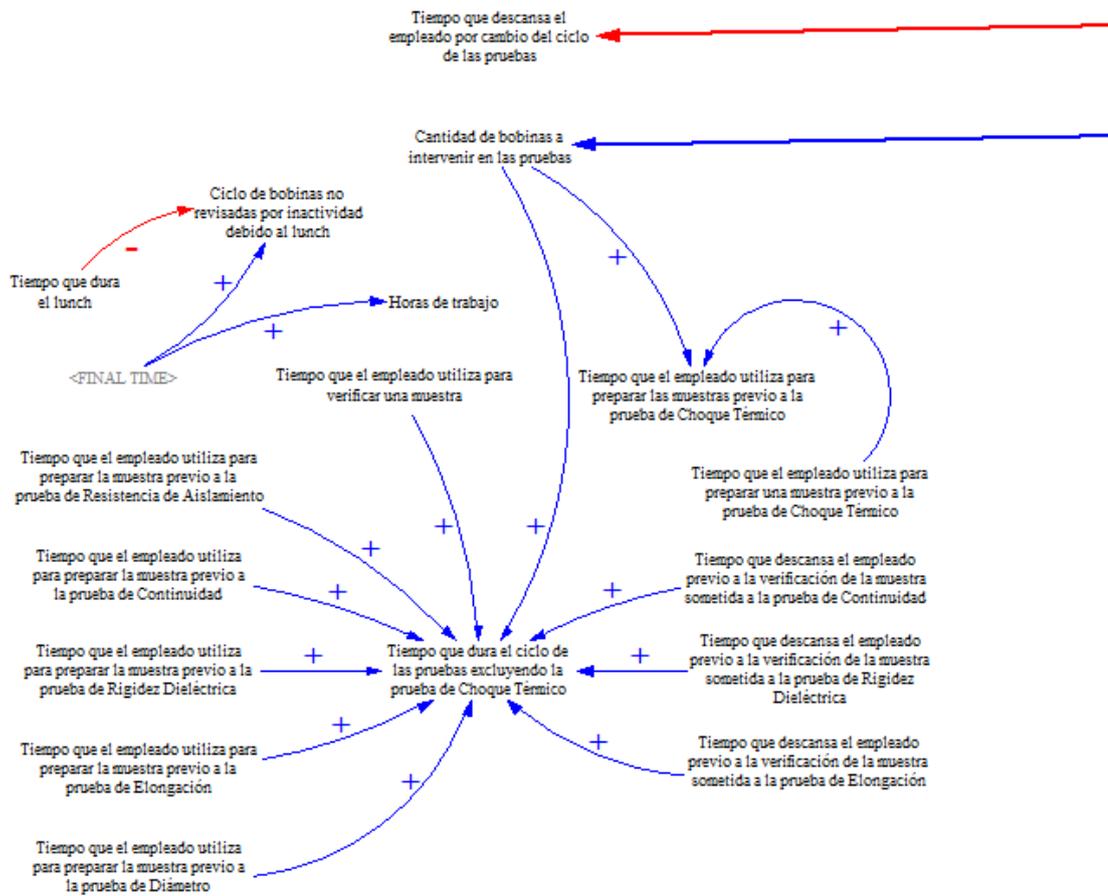


Figura 70: Sección del modelo completo y optimizado donde es controlado el ritmo de trabajo para el mejoramiento de los procesos a causa de la aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones (S-DBR)

Fuente: Elaboración propia

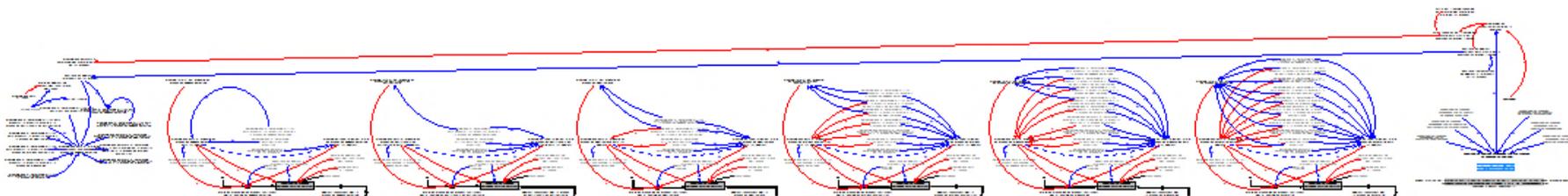


Figura 71: Modelo completo y optimizado mediante la aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones (Simplified Drum-Buffer-Rope)
Fuente: Elaboración propia

4.6.2. Simulación dinámica de sistemas

En esta sección se presentan los comportamientos y tendencias de las variables más importantes para cada prueba de control de calidad de bobinas y como resultado se tiene que una jornada de trabajo se aprueban 16 bobinas en promedio según como lo muestra la *Figura 78*.

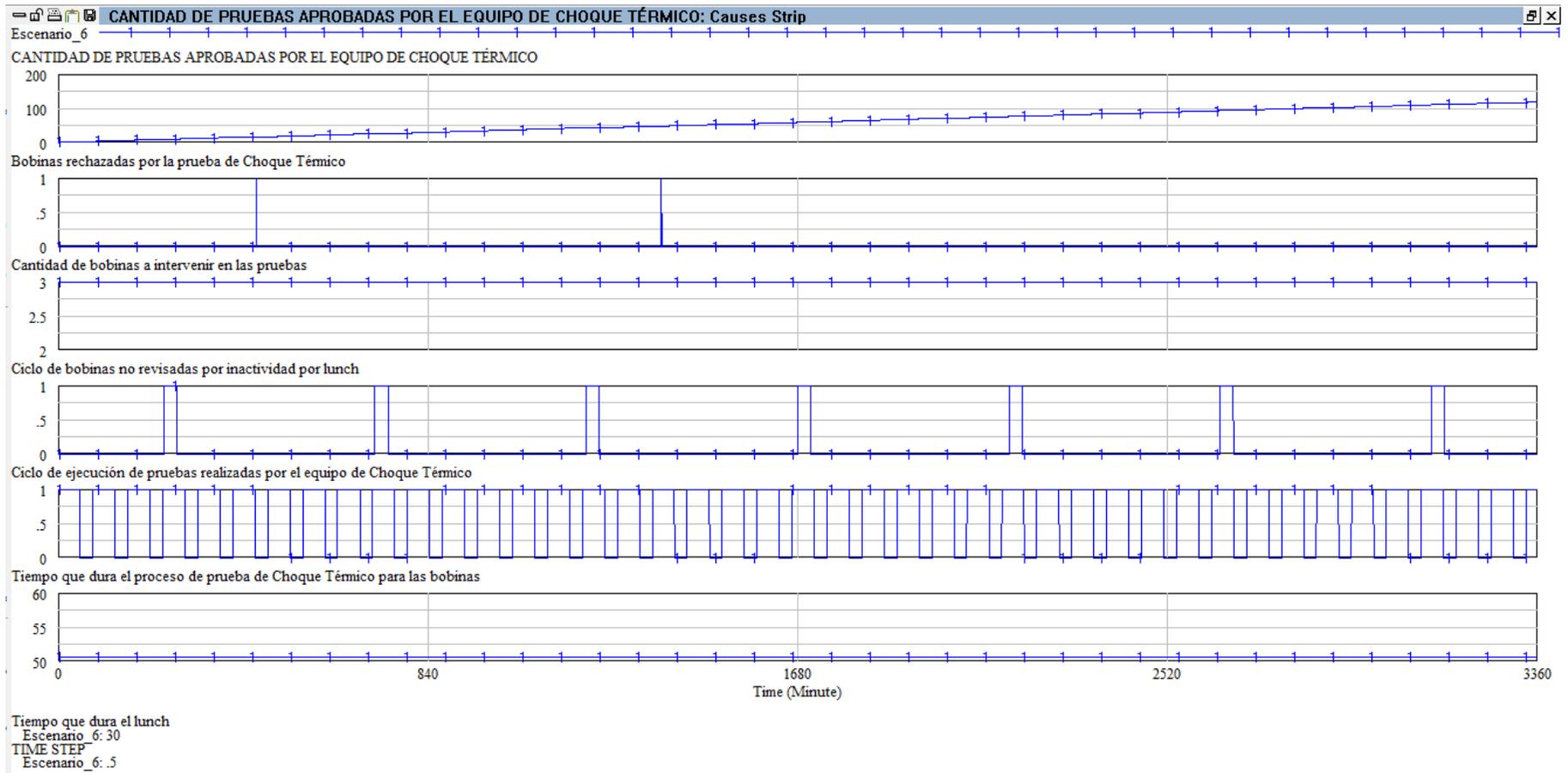


Figura 72: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Choque Térmico
Fuente: Elaboración propia

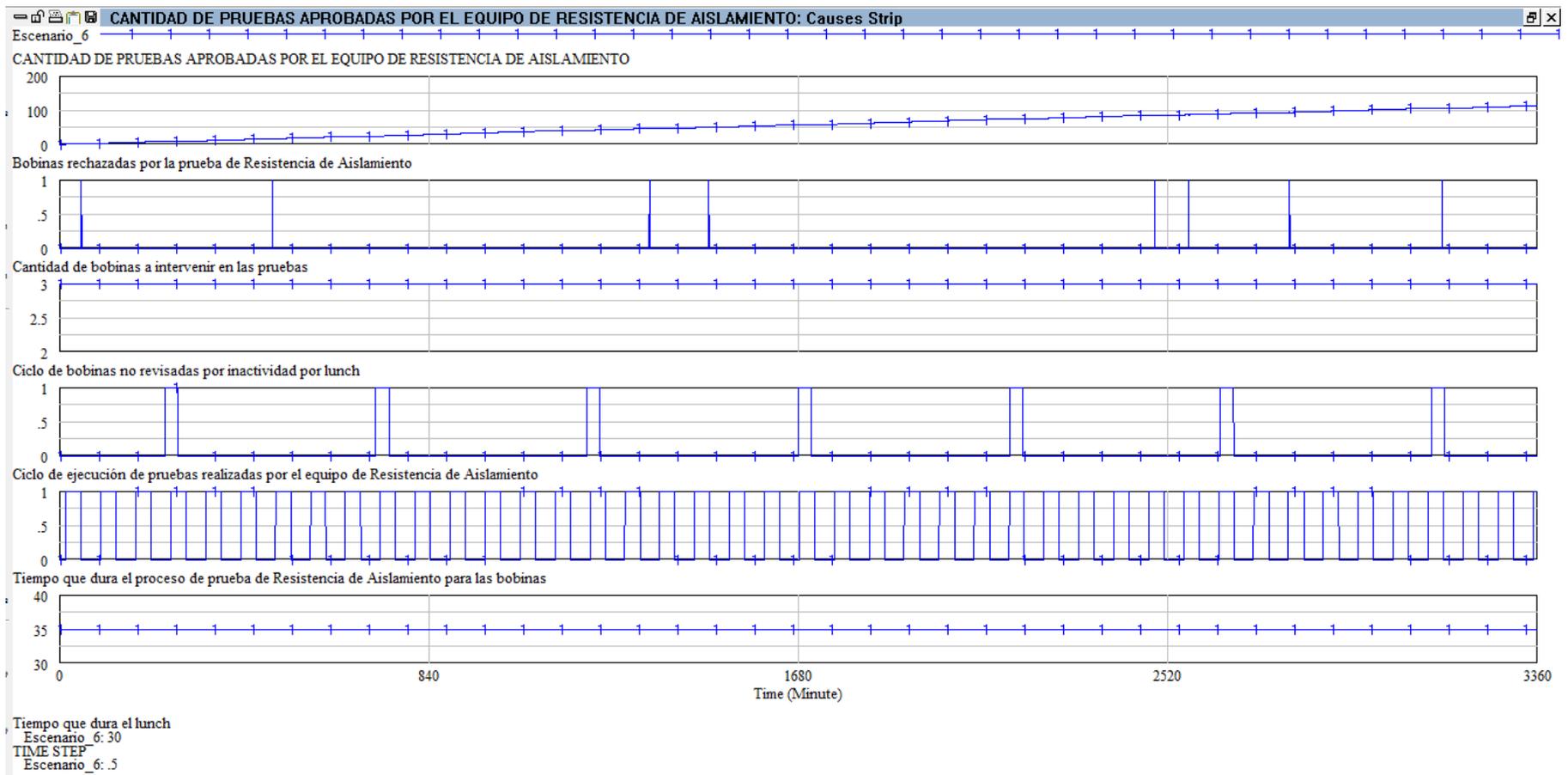


Figura 73: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Resistencia de Aislamiento

Fuente: Elaboración propia

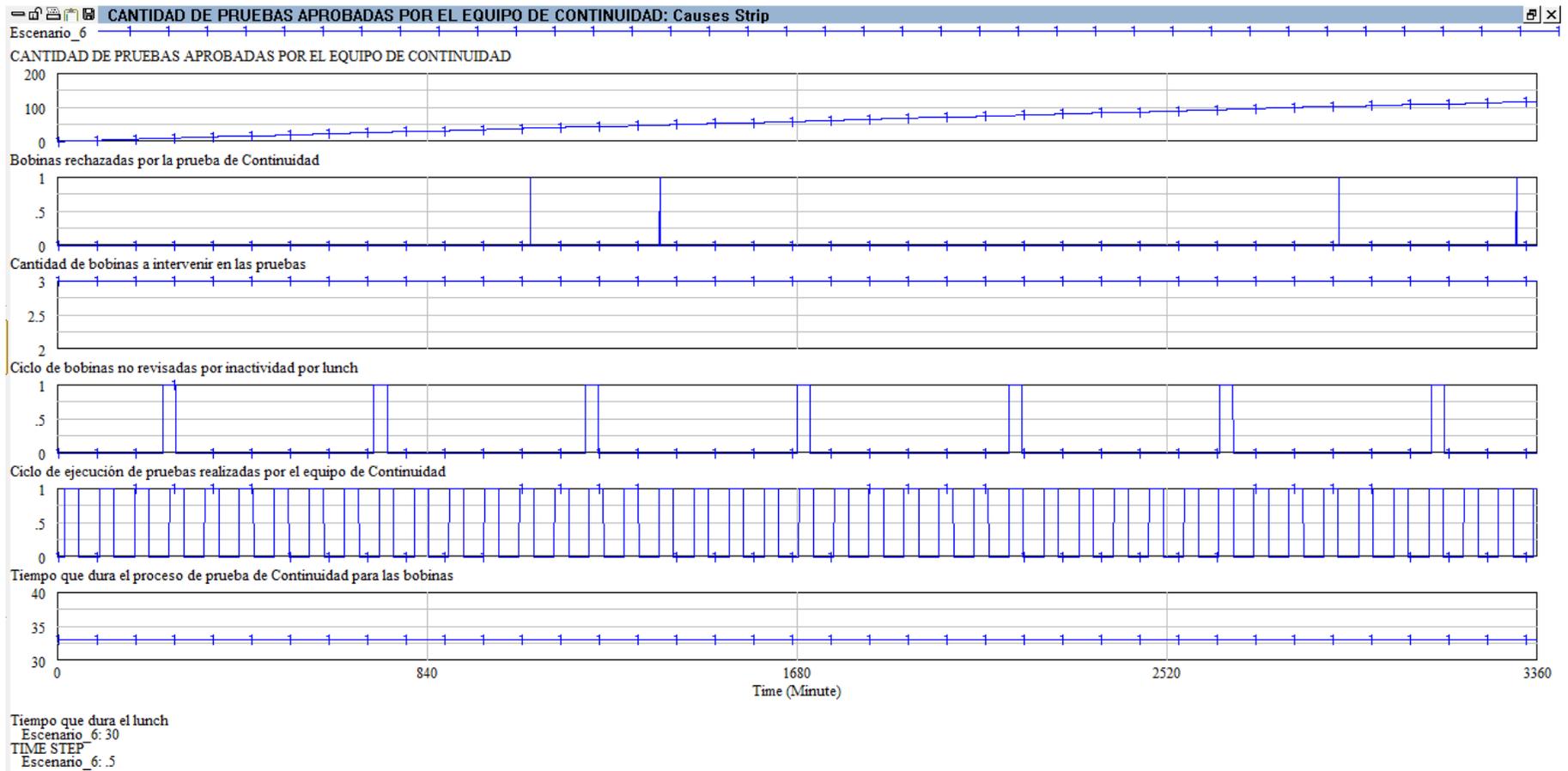


Figura 74: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Continuidad
Fuente: Elaboración propia

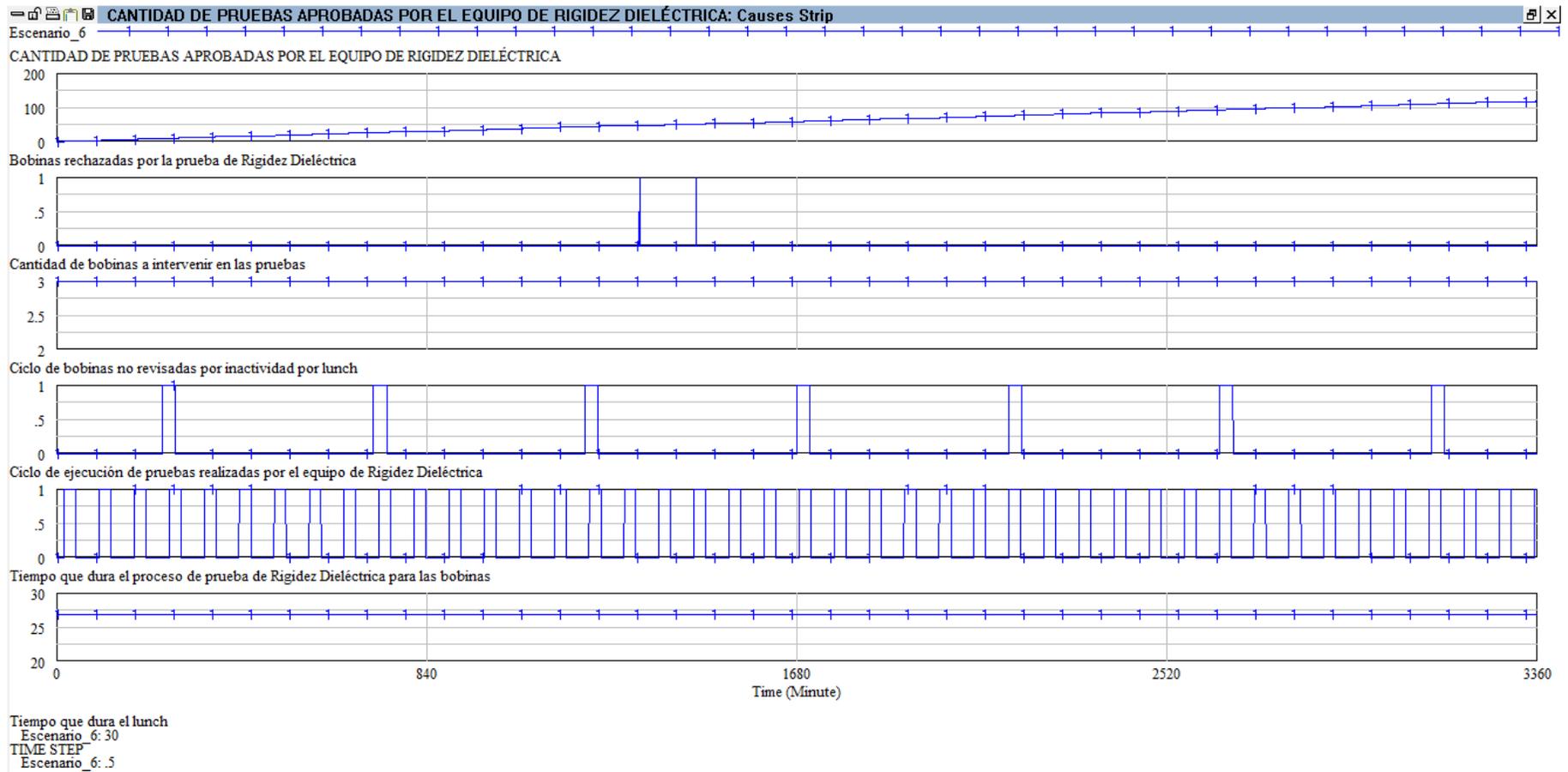


Figura 75: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Rigidez Dieléctrica

Fuente: Elaboración propia

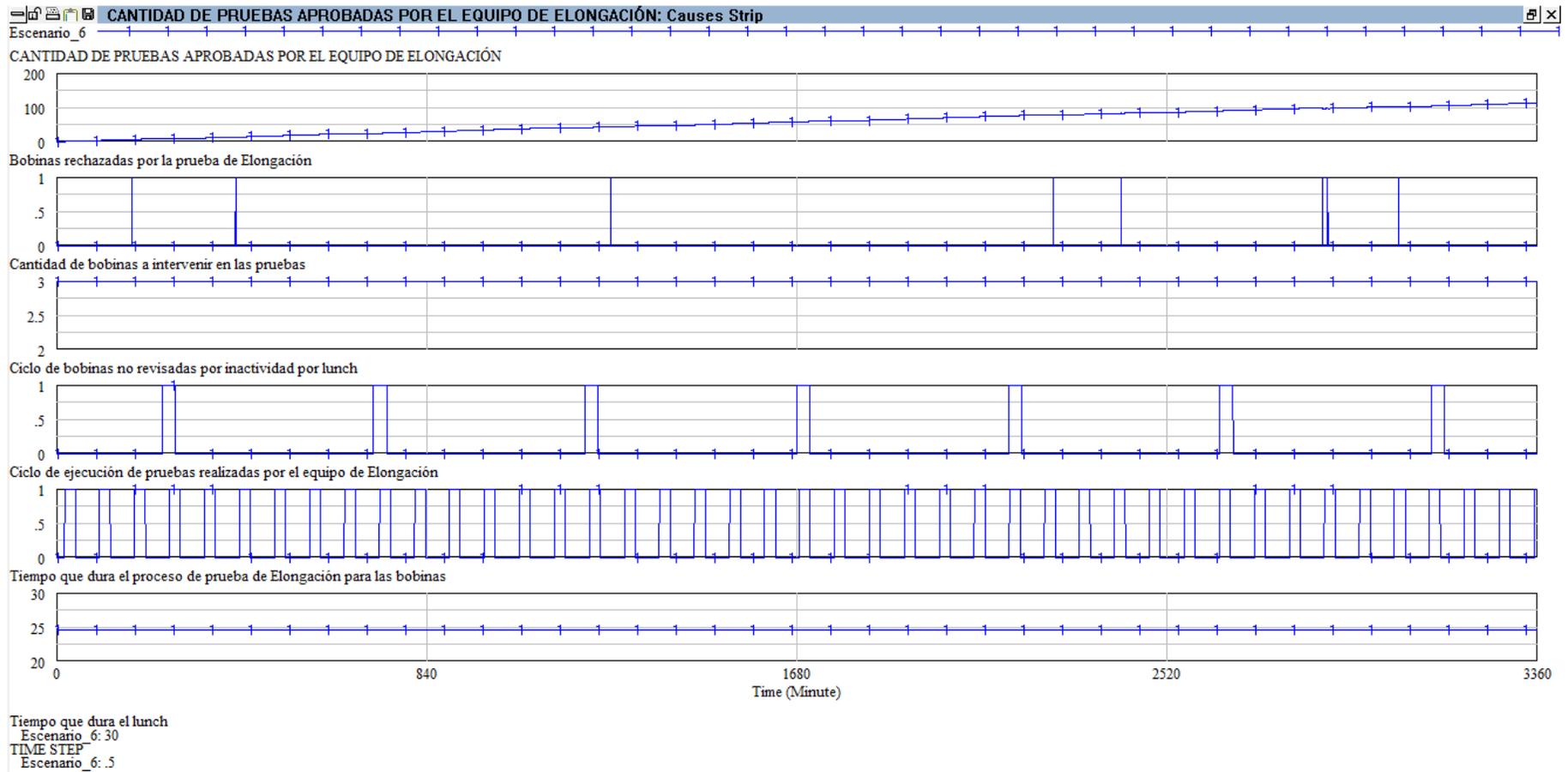


Figura 76: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Elongación

Fuente: Elaboración propia

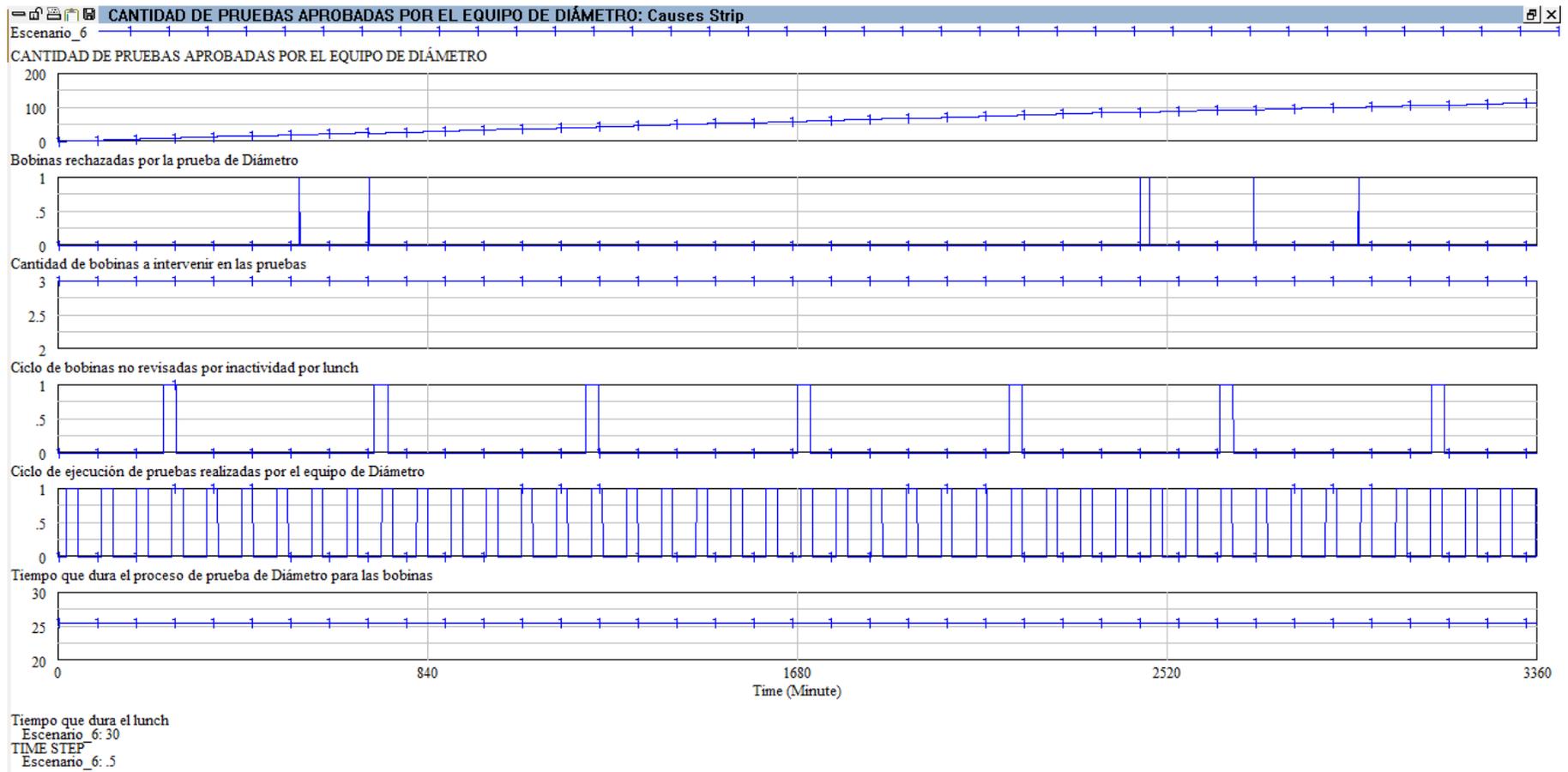


Figura 77: Outputs de gráficos de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Diámetro

Fuente: Elaboración propia

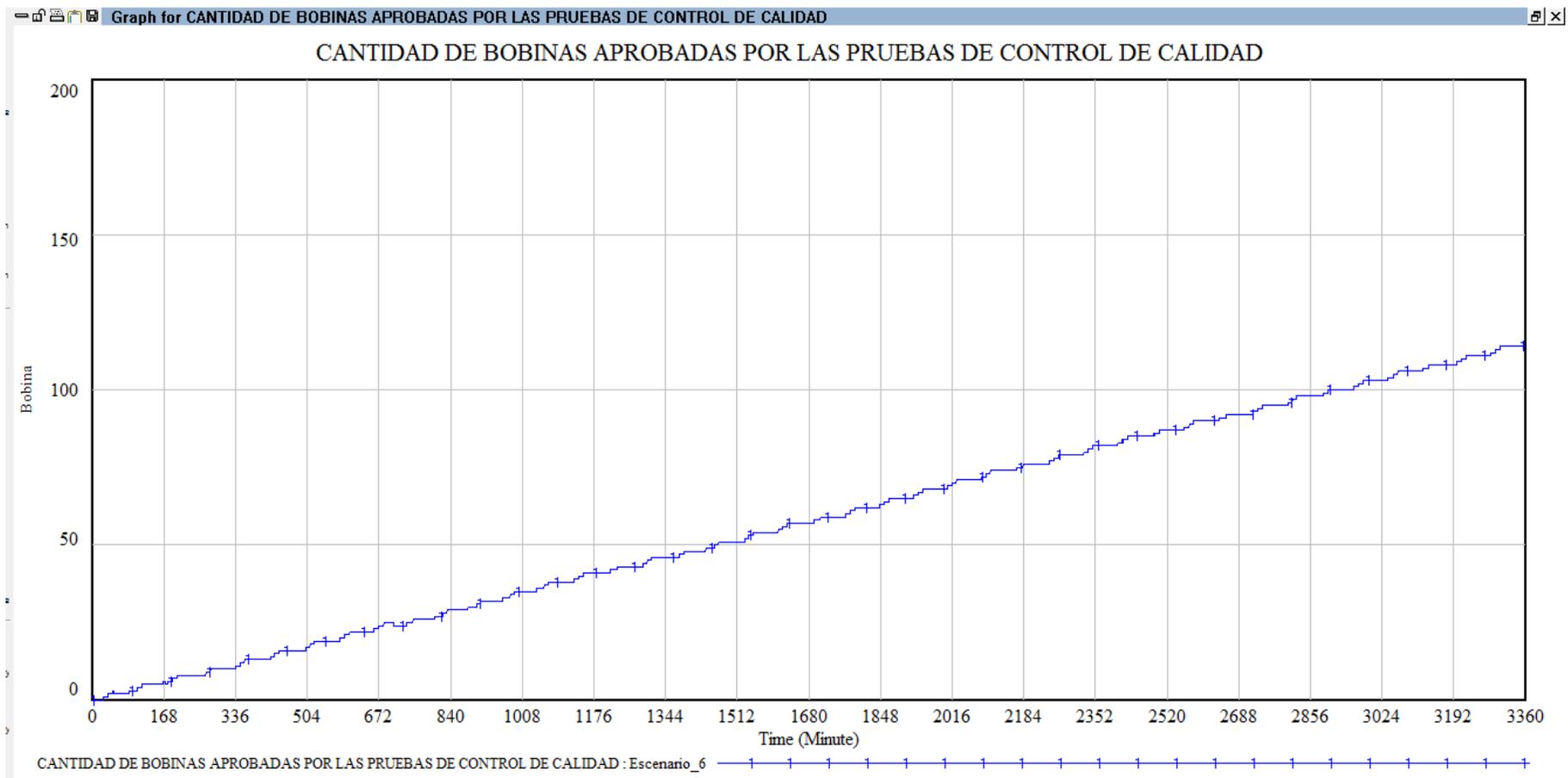


Figura 78: Output de gráfico de la variable cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad

Fuente: Elaboración propia

5. RESULTADOS - CASO DE ESTUDIO

5.1. ANÁLISIS DE ESCENARIOS Y ESTRATEGIAS

En esta sección se presentan los resultados del escenario inicial (sin aplicación de técnicas Lean ni TOC S-DBR), y dos escenarios con sus respectivas combinaciones de estrategias. También se muestran las situaciones óptimas (celdas con franjas celestes) donde se maximizan la productividad del supervisor ya sea con respecto a la demanda o por una jornada de trabajo.

5.1.1. Escenario Inicial del modelo

En la *Tabla 21* se presenta los resultados del escenario inicial o actual de los procesos de control de calidad de bobinas proveniente de la simulación de dinámica de sistemas del modelo optimizado, sin la aplicación de técnicas Lean ni TOC S-DBR donde las estrategias son inexistentes (*Cantidad incrementada de bobinas a intervenir en las pruebas = 0* y *Parte del tiempo reducido de descanso por cambio del ciclo de las pruebas = 1*).

ESCENARIO INICIAL: 16 [Bobina]			
ESTRATEGIAS		Tiempo [Minuto]	Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad [Bobina]
Cantidad incrementada de bobinas a intervenir en las pruebas [Bobina]	Parte del tiempo reducido de descanso por cambio del ciclo de las pruebas		
0	1	438,5	16

Tabla 21: Resultados del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR) para el escenario inicial o actual

Fuente: Elaboración propia

5.1.2. Escenario 1 con aplicación de técnicas Lean y TOC S-DBR

El escenario 1: *demanda = 20 bobinas* como se observa en la *Tabla 22*, la situación óptima respecto a la demanda se da cuando la cantidad incrementada de bobinas a intervenir en las pruebas es 3 y la parte del tiempo reducido de descanso por

cambio del ciclo de las pruebas es 4, donde sus resultados óptimos se muestran a continuación:

- Tiempo = 391,5 minutos
- Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad = 20 bobinas
- Indicador de abastecimiento de la demanda = 100% (Véase *Figura 79*)

Para el mismo escenario la situación óptima respecto a una jornada de trabajo se da cuando la cantidad incrementada de bobinas a intervenir en las pruebas es 1 y la parte del tiempo reducido de descanso por cambio del ciclo de las pruebas es 4, donde sus resultados óptimos se muestran a continuación:

- Tiempo = 435,0 minutos
- Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad = 22 bobinas
- Indicador de abastecimiento de la demanda = 110% (Véase *Figura 80*)

Por lo tanto, se concluye que efectivamente este escenario con sus estrategias óptimas supera el nivel de abastecimiento de la demanda que requiere como mínimo 20 bobinas en promedio al día, este excedente de la demanda es del 10%.

Se observa que para este escenario la cantidad óptima de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad excede en un 37,50% ($22 / 16 = 1,3750$) con respecto al escenario inicial, y el tiempo óptimo para la aprobación de esas 22 bobinas según lo indica este escenario se reduce en 3,5 minutos ($438,5 - 435,0 = 3,5$) respecto al tiempo del escenario inicial que solo revisa 16 bobinas al día.

ESCENARIO 1: DEMANDA = 20 [Bobina]							
ESTRATEGIAS		RESPECTO A LA DEMANDA			RESPECTO A UNA JORNADA DE TRABAJO		
<i>Cantidad incrementada de bobinas a intervenir en las pruebas [Bobina]</i>	<i>Parte del tiempo reducido de descanso por cambio del ciclo de las pruebas</i>	<i>Tiempo [Minuto]</i>	<i>Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad [Bobina]</i>	<i>Indicador de abastecimiento de la demanda [%]</i>	<i>Tiempo [Minuto]</i>	<i>Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad [Bobina]</i>	<i>Indicador de abastecimiento de la demanda [%]</i>
0	1	582,0	20	100	438,5	16	80
1	1	521,0	20	100	442,5	18	90
2	1	497,0	20	100	413,5	18	90
3	1	460,0	20	100	460,0	20	100
0	2	477,5	20	100	477,5	20	100
1	2	445,5	20	100	451,0	20	100
2	2	435,5	20	100	435,5	20	100
3	2	415,0	20	100	436,0	22	110
0	3	442,0	20	100	442,0	20	100
1	3	421,0	20	100	442,0	22	110
2	3	416,5	20	100	437,5	22	110
3	3	398,5	20	100	435,5	22	110
0	4	425,5	20	100	435,5	21	105
1	4	409,5	20	100	435,0	22	110
2	4	405,0	20	100	435,0	22	110
3	4	391,5	20	100	435,0	22	110

Tabla 22: Resultados del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR) para el primer escenario y sus 16 estrategias

Fuente: Elaboración propia

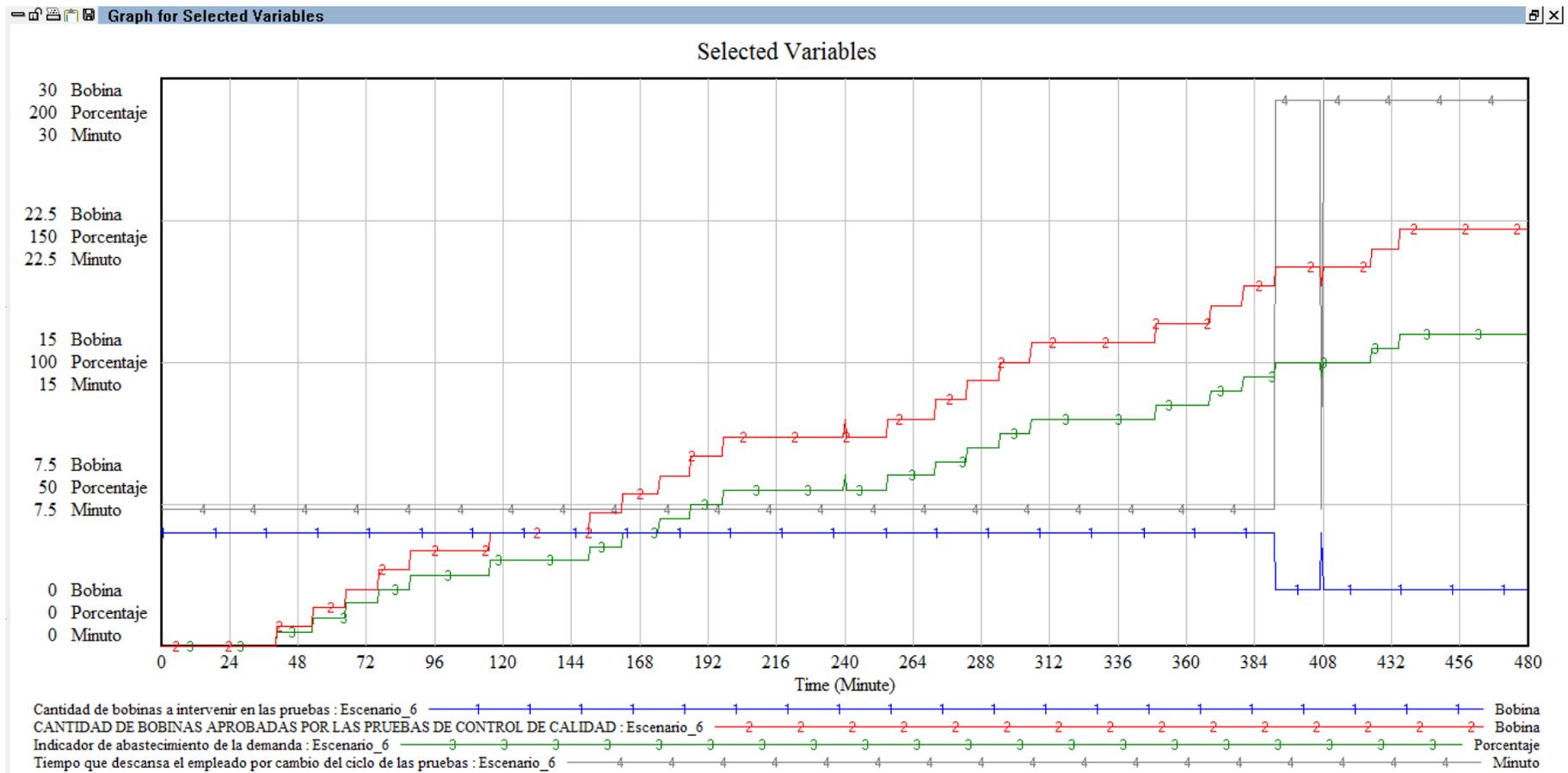


Figura 79: Outputs de gráficos del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR aplicado) para el escenario 1 (20 bobinas) respecto a la demanda

Fuente: Elaboración propia

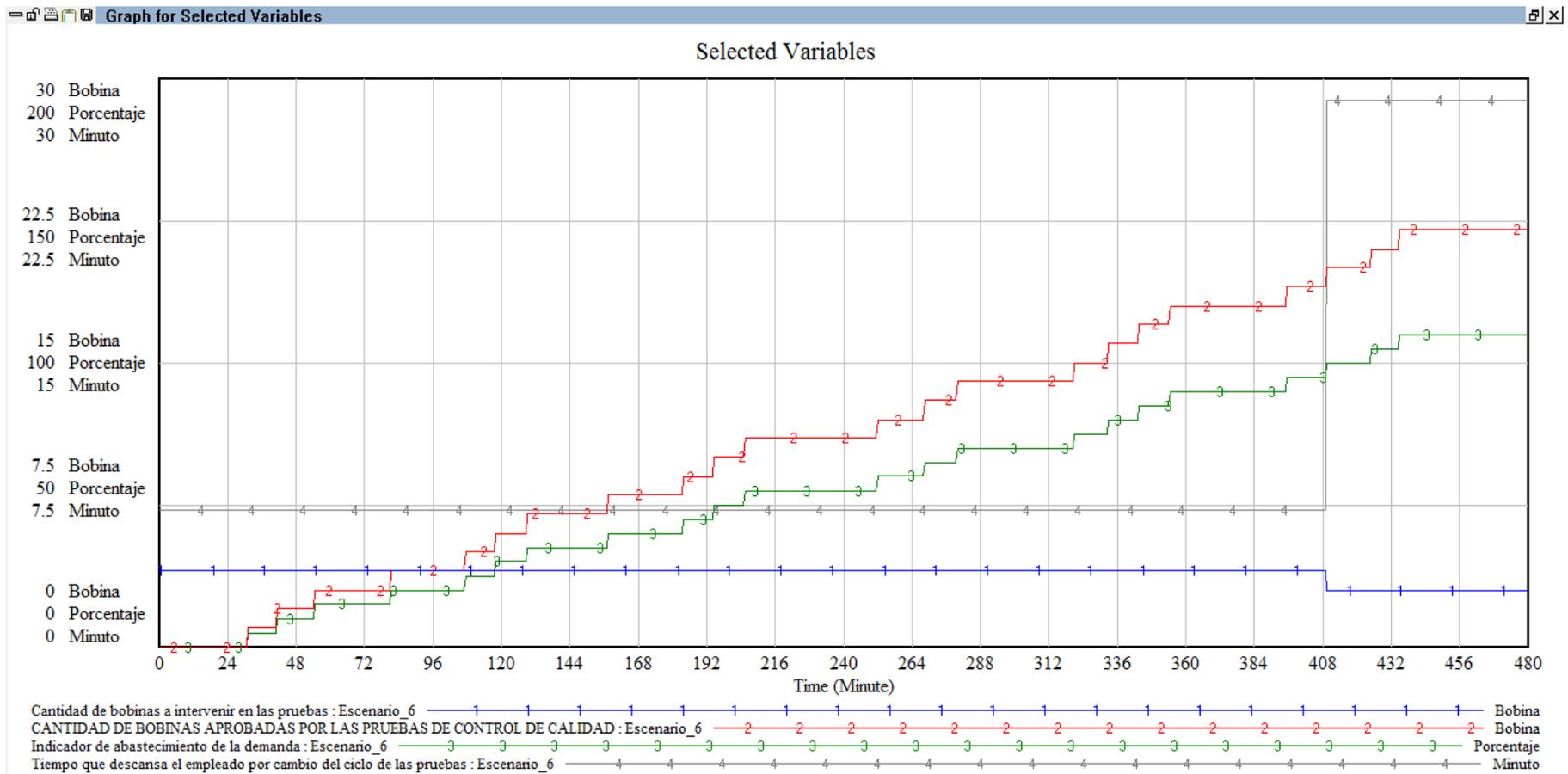


Figura 80: Outputs de gráficos del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR aplicado) para el escenario 1 (20 bobinas) respecto a una jornada de trabajo
Fuente: Elaboración propia

5.1.3. Escenario 2 con aplicación de técnicas Lean y TOC S-DBR

El escenario 2: *demanda = 21 bobinas* como se observa en la *Tabla 23*, la situación óptima respecto a la demanda se da cuando la cantidad incrementada de bobinas a intervenir en las pruebas es 3 y la parte del tiempo reducido de descanso por cambio del ciclo de las pruebas es 4, donde sus resultados óptimos se muestran a continuación:

- Tiempo = 402,5 minutos
- Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad = 21 bobinas
- Indicador de abastecimiento de la demanda = 100% (Véase *Figura 81*)

Para el mismo escenario la situación óptima respecto a una jornada de trabajo se da cuando la cantidad incrementada de bobinas a intervenir en las pruebas también es 3 y la parte del tiempo reducido de descanso por cambio del ciclo de las pruebas es 4, donde sus resultados óptimos se muestran a continuación:

- Tiempo = 435,0 minutos
- Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad = 23 bobinas
- Indicador de abastecimiento de la demanda = 109,5238% (Véase *Figura 81*)

Por lo tanto, se concluye que efectivamente este escenario con sus estrategias óptimas supera el nivel de abastecimiento de la demanda que requiere como mínimo 21 bobinas en promedio al día, este excedente de la demanda es del 9,52%.

Se observa que para este escenario la cantidad óptima de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad excede en un 43,75% ($23 / 16 = 1,4375$) con respecto al escenario inicial, y el tiempo óptimo para la aprobación de esas 23 bobinas según lo indica este escenario se reduce en 3,5 minutos ($438,5 - 435,0 = 3,5$) respecto al tiempo del escenario inicial que solo revisa 16 bobinas al día.

ESCENARIO 2: DEMANDA = 21 [Bobina]							
ESTRATEGIAS		RESPECTO A LA DEMANDA			RESPECTO A UNA JORNADA DE TRABAJO		
<i>Cantidad incrementada de bobinas a intervenir en las pruebas [Bobina]</i>	<i>Parte del tiempo reducido de descanso por cambio del ciclo de las pruebas</i>	<i>Tiempo [Minuto]</i>	<i>Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad [Bobina]</i>	<i>Indicador de abastecimiento de la demanda [%]</i>	<i>Tiempo [Minuto]</i>	<i>Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad [Bobina]</i>	<i>Indicador de abastecimiento de la demanda [%]</i>
0	1	592,0	21	100	438,5	16	76,1905
1	1	531,5	21	100	442,5	18	85,7143
2	1	508,0	21	100	413,5	18	85,7143
3	1	471,5	21	100	471,5	21	100
0	2	489,5	21	100	477,5	20	95,2381
1	2	458,0	21	100	458,0	21	100
2	2	446,5	21	100	446,5	21	100
3	2	426,0	21	100	436,5	22	104,7619
0	3	454,0	21	100	454,0	21	100
1	3	432,0	21	100	442,5	22	104,7619
2	3	427,5	21	100	437,5	22	104,7619
3	3	411,5	21	100	435,5	23	109,5238
0	4	435,5	21	100	435,5	21	100
1	4	420,0	21	100	440,5	23	109,5238
2	4	418,0	21	100	438,5	23	109,5238
3	4	402,5	21	100	435,0	23	109,5238

Tabla 23: Resultados del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR) para el segundo escenario y sus 16 estrategias

Fuente: Elaboración propia

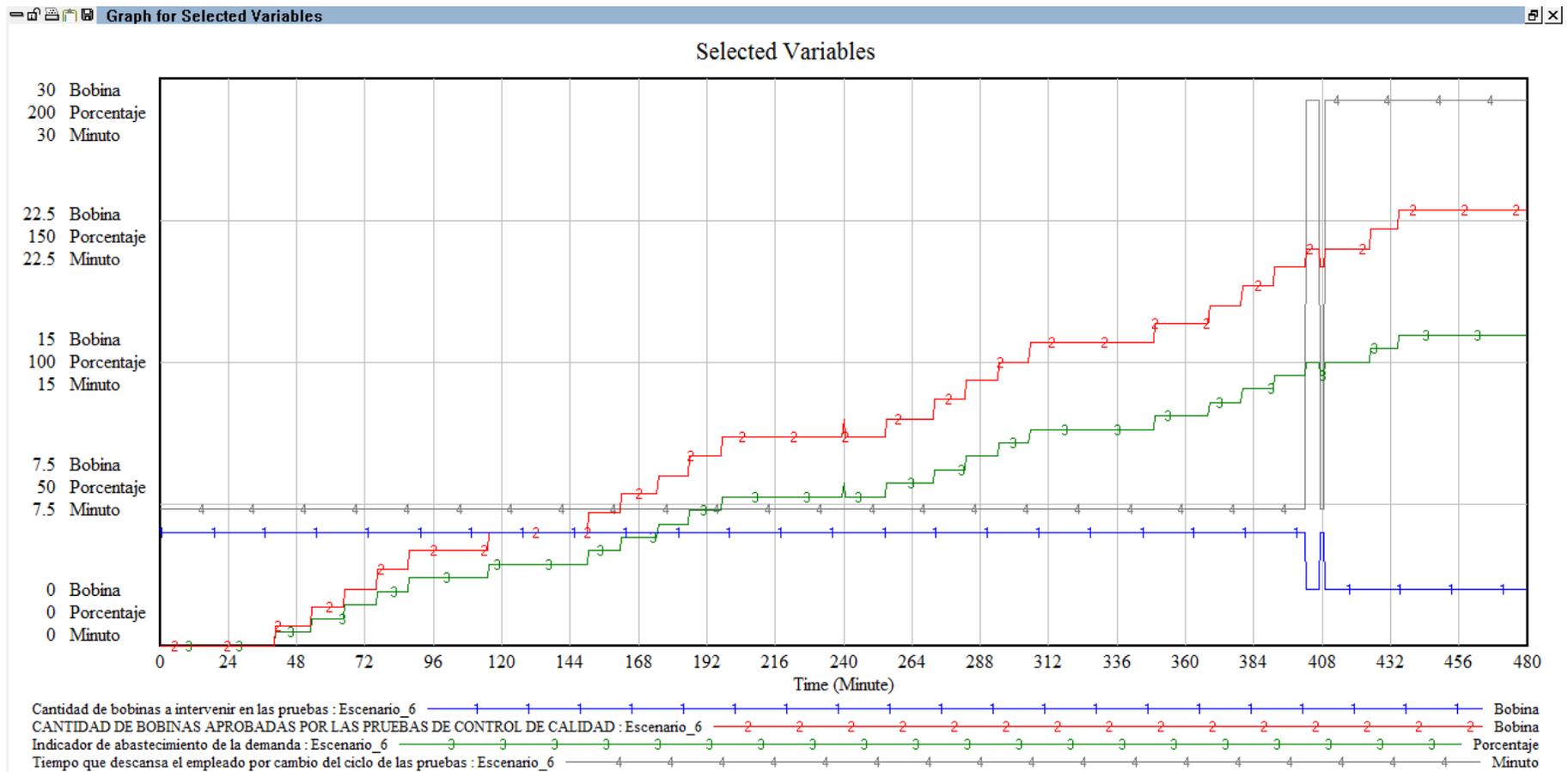


Figura 81: Outputs de gráficos del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR aplicado) para el escenario 2 (21 bobinas) respecto a la demanda o una jornada de trabajo

Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Mediante la aplicación de técnicas Lean y TOC (Simplified-DBR) basado en dinámica de sistemas mostrados en el proceso del marco metodológico e implementación, se pudo reducir el tiempo de los procesos de pruebas en el laboratorio de control de calidad de bobinas.

Los tiempos improductivos detectados al ejecutar la simulación según la Figura 53 que muestra el diagrama causal de inicio, (≈ 29 min. descansa el empleado por cambio del ciclo de las pruebas).

Se explicó el escenario inicial de los procesos de control de pruebas mediante diagramas causales y simulación.

Se comparó los resultados de dos escenarios respecto al inicial (Tabla 21), donde la máxima productividad del supervisor se logró con la identificación del tiempo (t^*) que maximizó la cantidad de bobinas aprobadas (B^*), con el uso de combinaciones de estrategias: Según la Tabla 22, con $B^* = 22$ bobinas diarias, se mejoró un 10% la productividad del supervisor en $t^* = 435,0$ min., reduciendo el tiempo de descanso por cambio de ciclo a la cuarta parte y aumentando una bobina más a las pruebas. Por otro lado, se observa en la Tabla 23, con $B^* = 23$ bobinas diarias, se mejoró un 9,52% su productividad en $t^* = 435,0$ min., reduciendo ese tiempo de descanso por cambio de ciclo a la cuarta parte y aumentando tres bobinas más a las pruebas.

6.2. Recomendaciones

Se les sugiere a las autoridades competentes de ELECTROCABLES C.A. llevar a cabo la implementación de la propuesta de mejora de los procesos de pruebas de alambres esmaltados en el laboratorio de control de calidad de bobinas, puesto que el

desarrollo de esta propuesta ha sido sustentado con resultados favorables que maximizaron la productividad del supervisor encargado del control de calidad de bobinas en el laboratorio de esmaltado, y por ende fueron conclusiones relevantes que lograron cubrir todos los objetivos descritos al principio de este documento.

REFERENCIAS

- (s.f.). Obtenido de Vensim: <http://vensim.com/vensim-ple-plus/>
- Aracil, J. (1995). *Dinámica de Sistemas* (Primera ed.). Madrid, España.
- Arias Odon, F. G. (1999). *El Proyecto de Investigación: Guía para su elaboración* (Tercera ed.). Caracas, Venezuela: Editorial Episteme, C.A. / Oriol Ediciones.
- Azian, N., Rahman, A., Mohd, S., & Mohamed, M. (2013). Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation. *Procedia Economics and Finance*, 7, 174-180. doi:10.1016/S2212-5671(13)00232-3
- Caselles Moncho, A. (2008). *Modelización y simulación de sistemas complejos*. Publicaciones de la Universitat de València.
- eduteka. (s.f.). *La Taxonomía de Bloom y sus actualizaciones*. Universidad Icesi . Cali: eduteka. Obtenido de <http://eduteka.icesi.edu.co/articulos/TaxonomiaBloomCuadro>
- Ekos. (2015). Obtenido de El Portal de Negocios del Ecuador: <http://www.ekosnegocios.com/Empresas/RankingEcuador.aspx>
- Electrocables C.A. (16 de Septiembre de 2010). Catálogos de Productos. ELECTROCABLES C.A.
- Electrocables C.A.* (28 de Julio de 2016). Obtenido de <http://electrocable.com/>
- Gupta, M. C., & Boyd, L. H. (2008). Theory of constraints : a theory for operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, 28(10), 991-1012. doi:10.1108/01443570810903122
- Hicks, C., Heidrich, O., McGovern, T., & Donnelly, T. (2004). A functional model of supply chains and waste. *International Journal of Production Economics*, 89, 165-174. doi:10.1016/S0925-5273(03)00045-8
- Hicks, C., Heidrich, O., McGovern, T., & Donnelly, T. (2004). A functional model of supply chains and waste. *International Journal of Production Economics*, 89, 165-174. doi:10.1016/S0925-5273(03)00045-8
- Kiani, B., Shirouyehzad, H., Khoshsaligheh Bafti, F., & Fouladgar, H. (2009). System dynamics approach to analysing the cost factors effects on cost of quality. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 26, 685-698. doi:10.1108/02656710910975750
- Laboratorio de Escritura Online (LEO) - Writing Resources. (s.f.). *Frases útiles para la escritura de ensayos y composiciones en español*. University of Southern California Dornsife , Laboratorio de Escritura Online (LEO). Los Angeles:

University of Southern California Dornsife . Obtenido de https://dornsife.usc.edu/assets/sites/385/docs/UsefulPhrases_in_SpanishWriting.pdf

- Luzardo Mota , H. E. (1 de Julio de 2014). Propuesta para mejorar el proceso de producción de alambre esmaltado en la empresa Electro cables C.A. *Propuesta para mejorar el proceso de producción de alambre esmaltado en la empresa Electro cables C.A.*, 142-143. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Industrial. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/4433>
- Morles, V. (1994). *Planeamiento y análisis de investigaciones* (Octava ed.). Caracas, Venezuela: El Dorado.
- Narvarte, J., Mardones, V., González, M., Vicuña, I., Arévalo, F., Gorigoitia, J., . . . Arroyo, R. (Septiembre de 2004). Conductores Eléctricos - El desafío de imponer la calidad sobre el precio. *ElectroIndustria*. Obtenido de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=144>
- Nguyen, M.-n., & Do, N.-h. (2016). Re-engineering Assembly line with Lean Techniques. (E. B.V., Ed.) *Procedia CIRP*, 40, 590-595. doi:10.1016/j.procir.2016.01.139
- Pegels, C. C., & Watrous, C. (2005). Application of the theory of constraints to a bottleneck operation in a manufacturing plant. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16, 302-311. doi:10.1108/17410380510583617
- Rawabdeh, I. A. (2004). A model for the assessment of waste in job shop environments. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(8), 800-822. doi:10.1108/01443570510608619
- Rusli, H. M., Jaffar, A., Suzilawati , M. K., & Mohd , T. A. (2014). Implementation of Lean Manufacturing through Supplier Kaizen Framework - A Case Study. 1, 2221-2228.
- Schragenheim, E., & Dettmer, H. W. (2000). *Simplified Drum-Buffer-Rope: A Whole System Approach to High Velocity Manufacturing*. Obtenido de <http://www.goalsys.com/books/documents/S-DBRPaper.pdf>
- Srinivasan, M., Jones, D., & Miller, A. (2004). Applying Theory of Constraints principles and Lean Thinking at the Marine Corps Maintenance Center. *Defense Acquisition Review Journal*.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. New York, United States of America: McGraw-Hill.
- System Dynamics Society*. (s.f.). Obtenido de <http://www.systemdynamics.org/what-is-s/#approach>
- Wixson, J. R., & Mills, J. I. (s.f.). A System Dynamics View of the Theory of Constraints.

Wong, Y. C., Wong, K. Y., & Ali, A. (2009). A study on lean manufacturing implementation in the Malaysian electrical and electronics industry. *European Journal of Scientific Research*, 38(4), 521-535. doi:10.1109/IACSIT-SC.2009.44

APÉNDICE A

Información del Contribuyente	
Razón Social:	ELECTROCABLES C.A.
RUC:	0990553742001
Fecha : 31-05-2016	
Nombre Comercial:	ELECTROCABLES C.A.
Estado del Contribuyente en el RUC	Activo
Clase de Contribuyente	Especial
Tipo de Contribuyente	Sociedad
Obligado a llevar Contabilidad	SI
Actividad Económica Principal	ACTIVIDADES DE FABRICACION DE CABLES ELECTRICOS Y AFINES
Fecha de inicio de actividades	25-09-1981
Fecha de cese de actividades	
Fecha reinicio de actividades	
Fecha actualización	14-01-2016

Información del Contribuyente			
Razón Social:	ELECTROCABLES C.A.		
RUC:	0990553742001		
Establecimiento Matriz			
No. de Establecimiento	Nombre Comercial	Ubicación del Establecimiento	Estado del Establecimiento
001	ELECTROCABLES C.A.	GUAYAS / GUAYAQUIL / VIA A DAULE KM 11.5 AV. PRINCIPAL S/N	Abierto
Establecimientos Adicionales			
No. de Establecimiento	Nombre Comercial	Ubicación del Establecimiento	Estado del Establecimiento
002	ELECTROCABLES C.A.	AZUAY / CUENCA / AV. GIL RAMIREZ DAVALOS S/N Y EL PEDREGAL	Abierto
003	ELECTROCABLES C.A.	PICHINCHA / QUITO / VIA PANAMERICANA NORTE KM 14.5 SAN ALFONSO S/N	Abierto

Fuente: Servicio de Rentas Internas

APÉNDICE B

#	Question	Type
<i>Category (1): Man</i>		
1.	Does the management transfer operators to various jobs and machines so that operations can be performed by all individuals?	To motion
2.	Do supervisors provide the amount and quality of supervision needed?	From motion
3.	Are hourly workers adequately supervised on evening shifts?	From defects
4.	Are positive steps taken to raise hourly workers' morale and work interest?	From motion
<i>Category (2): Material</i>		
8.	Is vendor lead time available to production schedulers?	To waiting
9.	Are schedules checked for material availability before release to production?	From waiting
10.	Are parts received in unitized loads?	From transportation
11.	Does production planning give warehouse personnel sufficient advance notice of items and stock activity?	From inventory
12.	Are warehouse personnel notified in advance of planned inventory changes?	From inventory
13.	Is there any excessive accumulation of materials awaiting repair, rework, or return to vendors?	From defects
14.	Do materials appear to be standing around piled up unnecessarily on the receiving platform?	From inventory
15.	Do production workers stand around waiting for materials to arrive?	From waiting
16.	Are materials moved more often than necessary?	To defects
17.	Are delicate parts frequently damaged in transportation activities?	From defects
<i>Category (3): Machine</i>		
32.	Are tests on the efficiency of the machines, standard to manufacturer's specifications, periodically conducted?	From process
33.	Is the workload for each machine predictable in sufficient detail?	To waiting
34.	Once a machine has been installed, is there follow-up to see if it performs according to specifications?	From process
35.	Is material-handling equipment capacity adequate to lift the heaviest jobs?	From transportation
<i>Category (4): Method</i>		
44.	Is warehouse space availability known in order to avoid blockage of warehouse aisles?	To transportation
45.	Is there a satisfactory drawing-numbering system that permits easy reference, storage and retrieval?	From motion
46.	Is storage space used effectively for storage with the aid of racks and forklift trucks?	From waiting
63.	Do most of products flow in one direction?	From motion
64.	Is there a group or committee, concerned with design, component, construction, drafting, and other forms of standardization?	From motion
65.	Do work standards have specific and known objectives, such as component cost reduction, work simplifications, and inventory control?	From motion
66.	Can work imbalances be forecast in time to adjust them?	From overproduction
67.	Are work procedures screening out redundant or unnecessary work?	From process
68.	Are the results of quality control, product testing, and evaluation passed on to engineering?	From defects

Cuestionario para la evaluación de desperdicios

Fuente: (Hicks C. , Heidrich, McGovern, & Donnelly, 2004)