

A simulation model employing system dynamics for the laboratory process analysis of the quality control of enameled wire coils

Victor Hugo González Jaramillo, PhD. M.E.¹, Miguel Escudero R., Ing.², Holger Raul Barriga, MBA³
Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Sociales y Humanísticas, Campus Gustavo Galindo Km 30.5
Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, vgonzal@espol.edu.ec¹, maescude@espol.edu.ec²,
hbarriga@espol.edu.ec³

Abstract– The company E.C. AC conducts quality control of the coils of enameled wires produced in its laboratory, where the company has several dedicated equipment. For this purpose, 20-21 bobbins per day are entered into the plant on average and a maximum of 16 bobbins per 8-h working day are inspected. A simulation was conducted using systems dynamics, coupled with certain processes that were improved by employing lean techniques and the theory of constraints (TOC), and the simplified drum–buffer–rope model (S-DBR) to reduce processing time and improve the productivity of the quality control processes of enameled wire coils.

Keywords– Keywords– Systems dynamics, lean techniques, theory of constraints, simplified drum–buffer–rope model.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.24>

ISBN: 978-0-9993443-0-9

ISSN: 2414-6390

Modelo de Simulación con Dinámica de Sistemas para el Análisis de los Procesos del Laboratorio de Control de Calidad de Bobinas de Alambre Esmaltado

Victor Hugo González Jaramillo, PhD. M.E.¹, Miguel Escudero R., Ing.², Holger Raul Barriga, MBA³
Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Sociales y Humanísticas, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, vgonzal@espol.edu.ec¹, maescude@espol.edu.ec², hbarriga@espol.edu.ec³

Resumen: La compañía E.C. C.A. realiza el control de calidad de las bobinas de alambre esmaltado producidas en su laboratorio donde tiene varios equipos dedicados. Para este fin, se ingresan de 20 a 21 bobinas por día en la planta en promedio, y se llega a inspeccionar como máximo 16 por jornada de trabajo de 8 horas. Se realizó un modelo de simulación usando Dinámica de Sistemas, complementado con el mejoramiento de procesos mediante la aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones (TOC) usando el modelo de Simplified Drum-Buffer-Rope (S-DBR) para reducir los tiempos y mejorar la productividad de los procesos de control de calidad de las bobinas de alambre esmaltado

Palabras claves: Dinámica de Sistemas, Técnicas Lean, Teoría de Restricciones, Simplified Drum-Buffer-Rope.

I. INTRODUCTION

En la industria manufacturera de artículos eléctricos y electrónicos en el Ecuador, las utilidades sobre los ingresos en el año 2015 fueron del 7,91% en promedio. La empresa analizada en esta investigación obtuvo el 6,58% de utilidades respecto a sus ventas, siendo sus ingresos en el mismo año de \$68.323.256 aproximadamente [1].

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, en esta industria de manera particular está fuertemente acentuado, por la competencia establecida entre fabricantes locales e 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 [2].

II. REVISIÓN DE LITERATURA

A. Desperdicios existentes en empresas

En el artículo científico: “A functional model of supply chains and waste” [3] se presentó un caso de estudio de una empresa mediana llamada PlasticCo situada en Inglaterra,

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.24>
ISBN: 978-0-9993443-0-9
ISSN: 2414-6390

15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Global Partnerships for Development and Engineering Education”, 19-21 July 2017, Boca Raton, Florida, USA.

dedicada a la fabricación de productos de plástico perecederos con comercialización tanto nacional como en los mercados de exportación [3].

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, y la reducción de barreras para la gestión efectiva de desperdicios, lo cual da como resultado una comunicación más fluida entre organizaciones [3].

B. Técnicas Lean

En el artículo científico: “A Study on Lean Manufacturing Implementation in the Malaysian Electrical and Electronics Industry” [4] se analizó a algunas empresas de la industria eléctrica y electrónica en Malasia. Las empresas del área eléctrica se relacionan con aparatos domésticos eléctricos, componentes eléctricos, y productos eléctricos industriales; mientras las de electrónica se relacionan con componentes electrónicos, electrónica industrial, y electrónica de consumo [4].

La metodología de recolección de datos que utilizaron los autores de este estudio fue la encuesta. Las muestras fueron obtenidas del FMM-MATRADE INDUSTRY DIRECTORY (ELECTRICAL AND ELECTRONICS) 2007/2008. Se seleccionaron 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 o gerentes generales de esas empresas [4].

C. Teoría de Restricciones

En el trabajo de investigación: “Simplified Drum-Buffer-Rope: A Whole System Approach to High Velocity Manufacturing” [5], se estudió la diferencia entre el DBR (Drum-Buffer-Rope) tradicional y 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 [5].

En la satisfacción del cliente el S-DBR es dominante respecto al DBR tradicional porque su factor de restricción viene dado por la demanda, la cual debe centrarse para no descuidarla [5]. 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 [5]. 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, que podrían no invertir en software especializado DBR [5].

D. 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” [6] se presentó un caso de estudio en el Centro de Mantenimiento de la Base Logística de la Infantería Marina situada en Albania, el cual era responsable de la regeneración y reconstitución de los equipos requeridos por el cuerpo de marina de preparación para el combate [6].

En la Figura 1 se presenta el modelo tradicional DBR donde se observa que el ritmo de producción lo marca el recurso de capacidad limitada (800 unidad 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

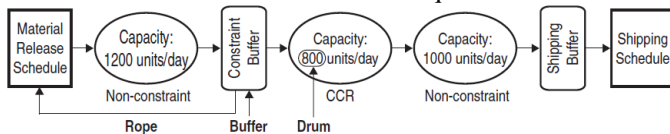


Fig. 1 Modelo Drum-Buffer-Rope tradicional
Fuente: (Srinivasan, Jones, & Miller, 2004)

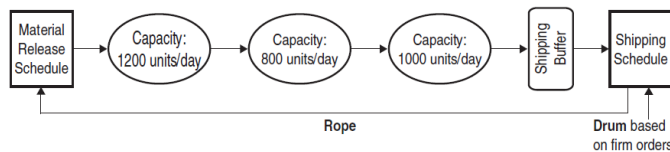


Fig. 2 Modelo Drum-Buffer-Rope simplificado
Fuente: (Srinivasan, Jones, & Miller, 2004)

En cambio, la Figura 2 muestra el modelo del S-DBR donde la restricción viene dada directamente por la demanda y frente a ella existe un buffer denominado buffer de envío.

III. METODOLOGÍA DEL MODELO DESARROLLADO

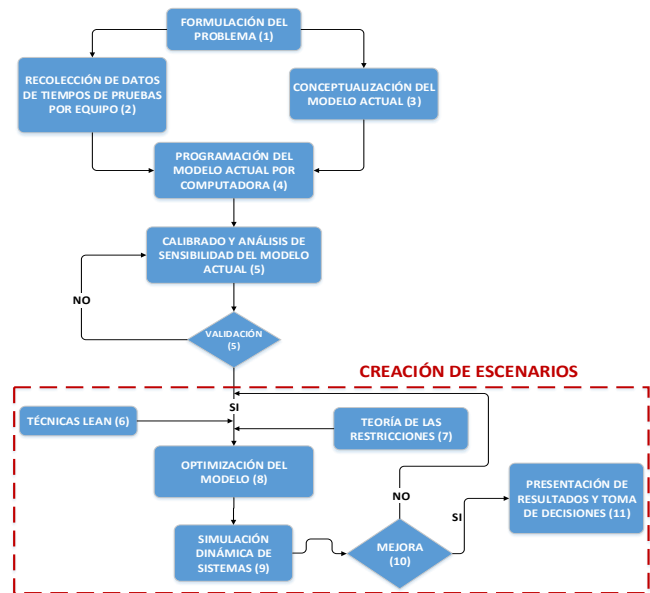


Fig. 3 Proceso del marco metodológico e implementación

Para el propósito de esta investigación, se comenzó identificando el problema, como lo sugiere la Figura 3. Los pasos realizados fueron los siguientes:

- Identificación de cuello de botella en la revisión de las bobinas
- Obtención de 112 muestras por equipo usando cronómetro
- Análisis de datos y distribuciones usando @RISK
- Identificación de variables y constantes
- Elaboración de diagramas causales para la relación causa-efecto entre variables
- Establecimiento de reglas y/o ecuaciones
- Realización de test de prueba y error corriendo el modelo con valores que se aproximan a la realidad de los procesos actuales de las pruebas de control de calidad
- Programación del modelo usando el software VENSIM.
- Mejoramiento de los procesos mediante la aplicación de técnicas Lean y Teoría de Restricciones para la presentación de resultados y toma de decisiones

A. Lista de variables y especificaciones en el modelo actual

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 flujo, 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. Las variables auxiliares representan pasos intermedios para la determinación de las variables de flujo a partir de las variables de nivel.

Finalmente, las constantes son valores fijos que no varían con el tiempo. Véase Tabla I, II, y Tabla III.

Tabla I
CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE NIVEL Y DE FLUJO DEL MODELO ACTUAL

| Código | Nombre | Tipo |
|------------|--|-----------------------------|
| (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 | |

Tabla III
CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES AUXILIARES DEL MODELO ACTUAL

| Código | Nombre | Tipo |
|------------|--|----------------------|
| (A_I) | 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_e) | 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 3: Clasificación de las variables auxiliares del modelo actual
Fuente: Elaboración propia

Tabla II
CLASIFICACIÓN DE LAS CONSTANTES DEL MODELO ACTUAL

| 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 2: Clasificación de las constantes del modelo actual
Fuente: Elaboración propia

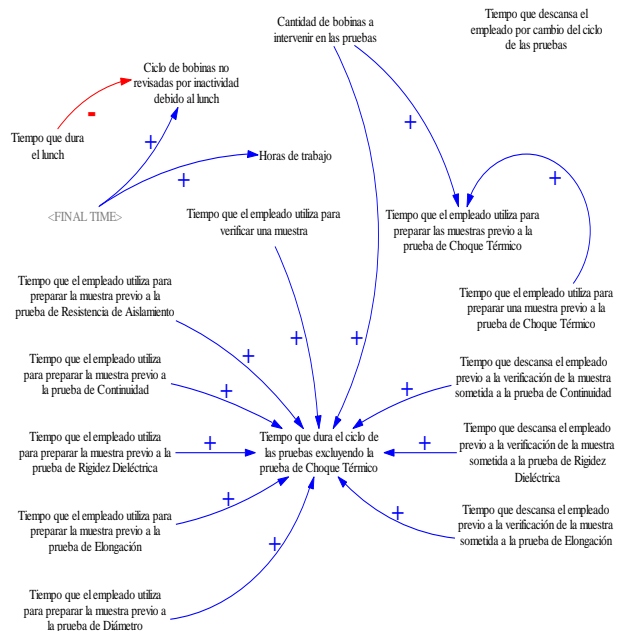


Figura 4: Diagrama causal de inicio

B. Diagramas causales con dinámica de sistemas

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 se presenta en la Figura 4. Se puede observar en 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 cambio 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 de la muestra debido a que este equipo puede realizar las tres pruebas simultáneamente, situación que no ocurre con las demás muestras, es decir, que todas las pruebas excepto la de Choque Térmico pueden realizarse sólo en una muestra permaneciendo las otras dos muestras en espera o en cola hasta que se termine la prueba que se inició.

Por esta razón 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 afectada 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

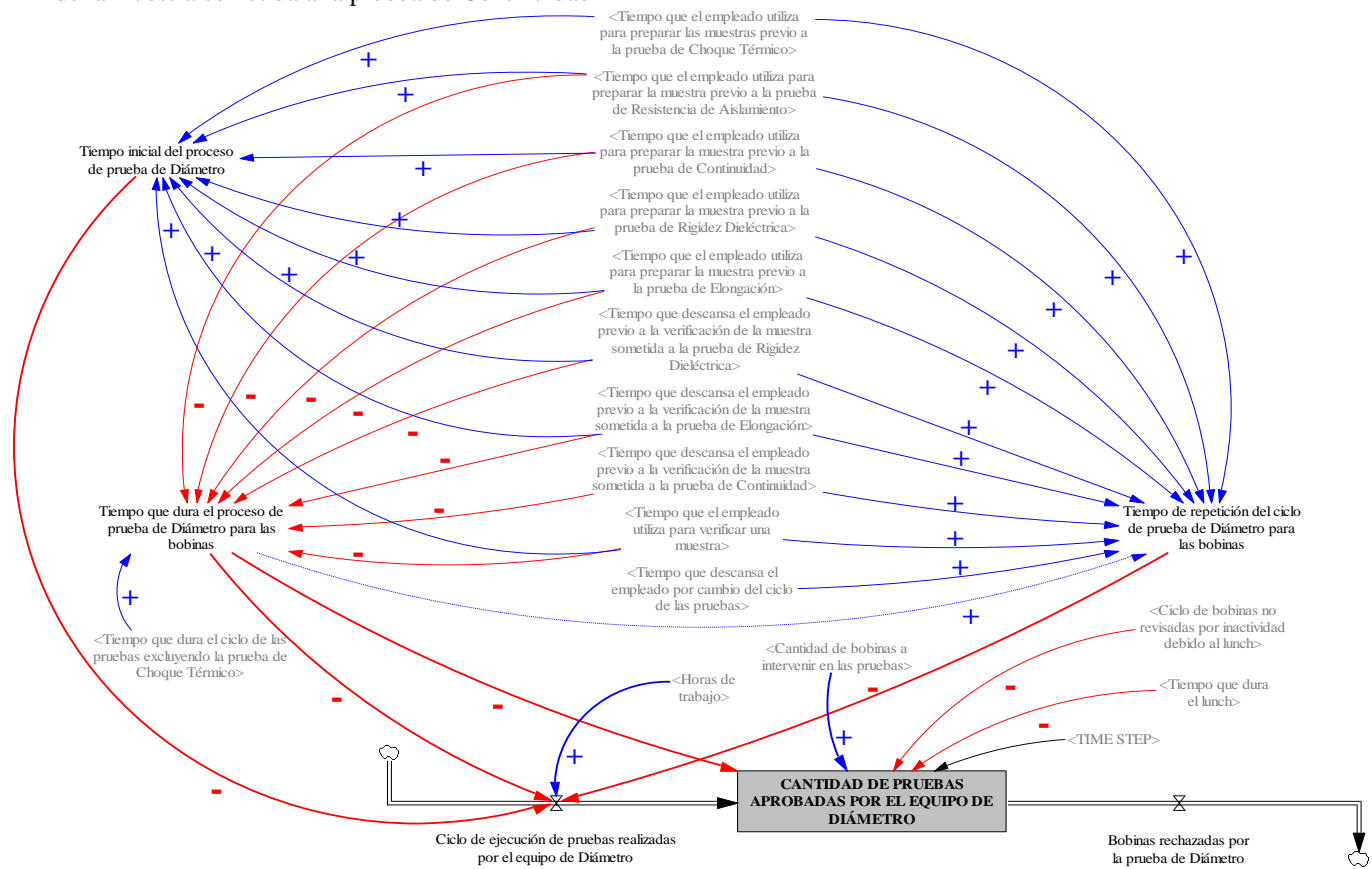


Fig. 5 Diagrama causal del proceso de pruebas del equipo de Diámetro

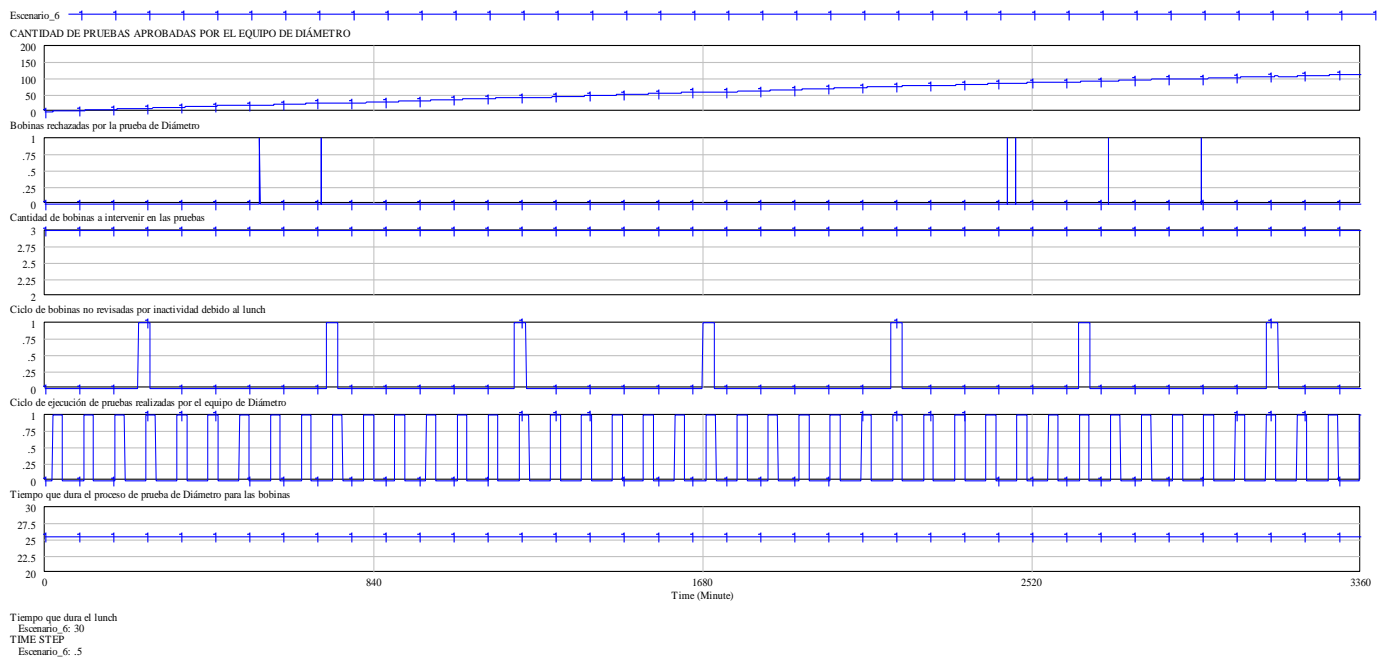


Fig. 6 Gráficos de salidas de variables y constantes que afectan directamente a la variable cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Diámetro

El segundo diagrama causal del modelo actual se presenta en la Figura 5. Se puede observar que el diagrama está compuesto por una variable de nivel, dos variables de flujo, siete variables auxiliares y doce constantes. En la Figura 6 se muestran las salidas del modelo

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 de 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 que se mencionan 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 cuando se incrementa 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.

El diagrama causal del modelo actual que incorpora los diagramas de todos los procesos de control de calidad realizados se presenta en la Figura 7. Se puede observar en 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 unidades defectuosas detectadas.

Esta variable auxiliar es afectada de manera positiva cuando se incrementa el valor de las variables de nivel presentadas a continuación:

- Cantidad de pruebas aprobadas por el equipo de Choque Térmico

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

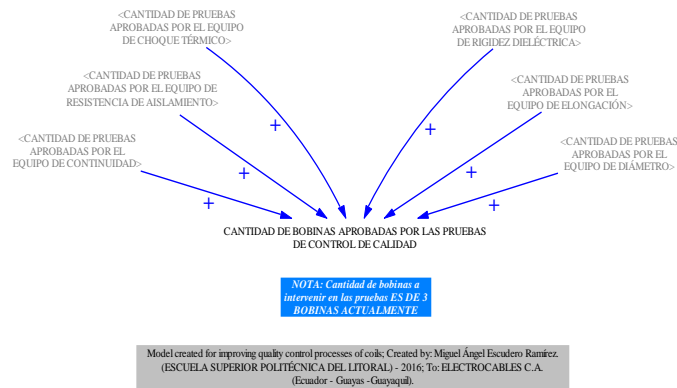


Fig. 7 Diagrama causal de todos los procesos de control de calidad de bobinas

En la Figura 8 se muestra un nuevo diagrama que incorpora el diagrama causal anterior y el control sobre el ritmo de trabajo para el mejoramiento de los procesos mediante la aplicación de las técnicas Lean y Teoría de Restricciones. Se puede observar en esta Figura que la cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad afecta de manera positiva al indicador de abastecimiento de la demanda, mientras la demanda tiene un efecto negativo sobre la misma variable.

La cantidad de bobinas incrementadas para ajuste de la demanda en menor tiempo es afectada de forma positiva por la cantidad incrementada de bobinas a intervenir en las pruebas pero es afectada de manera negativa por el indicador de abastecimiento de la demanda. Finalmente la parte reducida del tiempo de descanso para ajuste de la demanda en menor tiempo es afectada de manera negativa por la parte del tiempo reducido por descanso por cambio del ciclo de pruebas y también por el indicador de abastecimiento de la demanda.

En la Figura 9 se puede apreciar la salida obtenida para la variable cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad en función de los diagramas causales para las seis variables de nivel utilizadas. Finalmente, en las Figuras 10 y 11, se tiene el modelo completo y optimizado donde es controlado el ritmo de trabajo para el mejoramiento de los procesos a causa de la aplicación de Técnicas de Lean y Teoría de Restricciones (S-DBR).

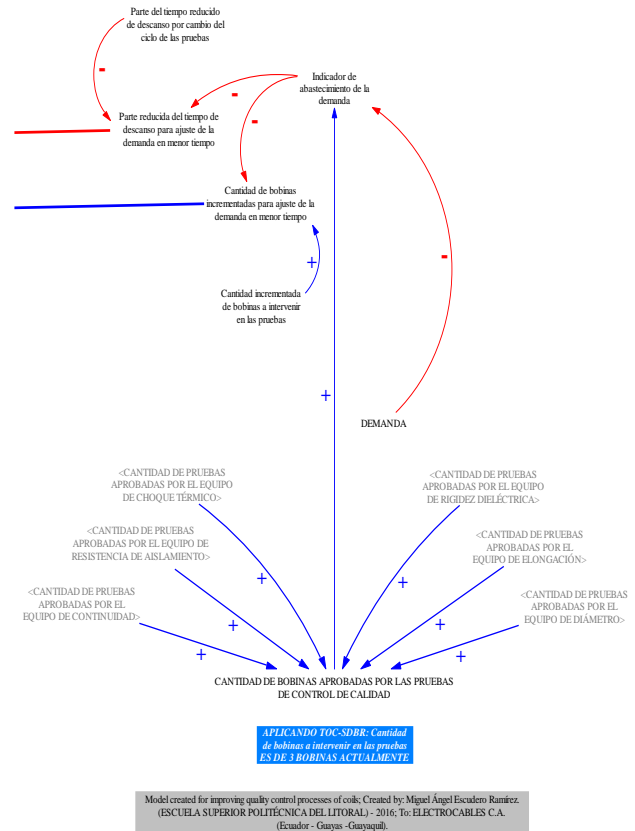


Fig. 8 Sección del modelo completo y optimizado donde se controla el ritmo de trabajo para el mejoramiento de los procesos

Una perspectiva general del modelo Simplified Drum-Buffer-Rope (SDB-R) se muestra en la Figura 11, donde se pueden ver las seis variables de nivel que contribuyen a la cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad propuestas en el análisis del modelo.

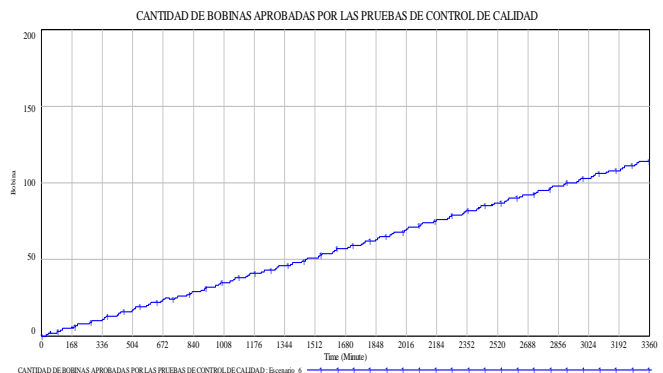


Fig.9 Gráfico de la variable cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad

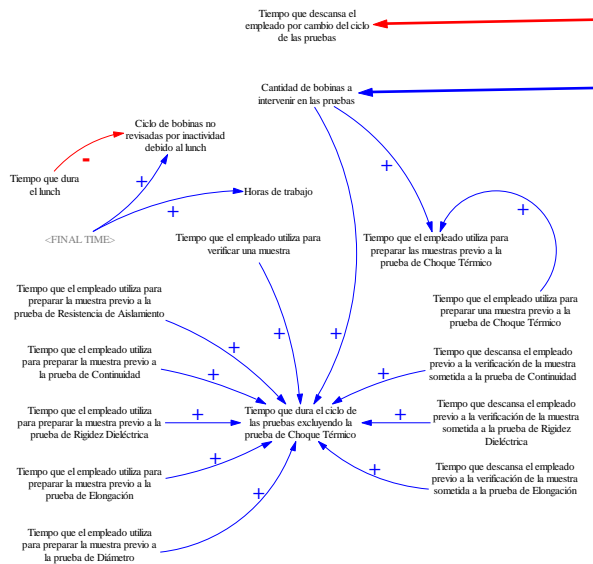


Fig. 10 Sección del modelo completo y optimizado donde es controlado el ritmo de trabajo para el mejoramiento de los procesos a causa de la aplicación de Técnicas Lean y Teoría de Restricciones (S-DBR)

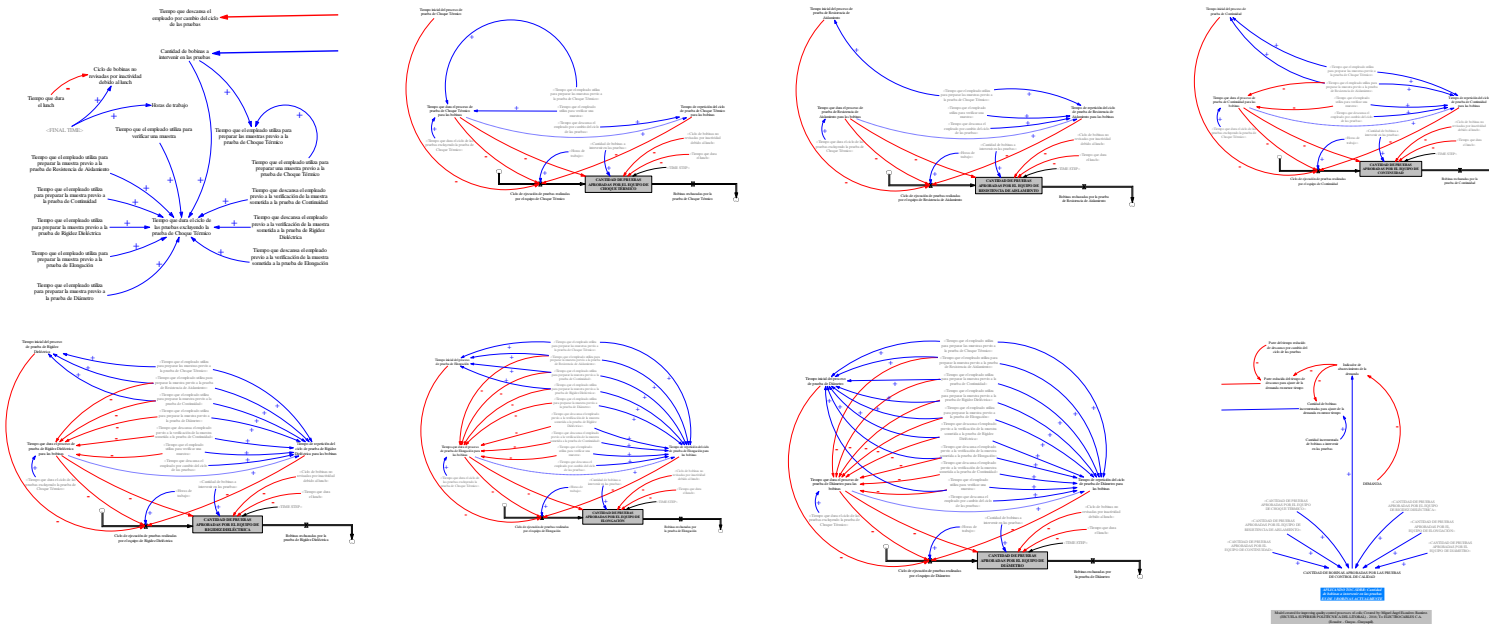


Fig. 11 Modelo completo y optimizado mediante la aplicación de Técnicas Lean y Teoría de Restricciones (Simplified Drum-Buffer-Rope)

IV. SIMULACION Y RESULTADOS

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 con respecto a la demanda o a una jornada de trabajo.

A. Escenario Inicial del modelo

En la Tabla IV se presenta los resultados del escenario inicial o actual de los procesos de control de calidad de las 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. Para este caso la 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.

TABLA IV
RESULTADOS DEL MODELO OPTIMIZADO (TÉCNICAS LEAN Y TOC S-DBR)
PARA EL ESCENARIO INICIAL

| 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 |

B. Escenario 1 con técnicas Lean y TOC S-DBR

En el escenario 1 la demanda = 20 bobinas como se observa en la Tabla V, 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. En esta condición se dan los siguientes resultados:

- Tiempo = 391,5 minutos
- Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad = 20 bobinas
- Indicador de abastecimiento de la demanda = 100%

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. En esta condición se dan los siguientes resultados:

- Tiempo = 435,0 minutos
- Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad = 22 bobinas
- Indicador de abastecimiento de la demanda = 110%

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. El excedente de la demanda es del 10%. Se observa también 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.

C. Escenario 2 con técnicas Lean y TOC S-DBR

En el escenario 2, la demanda = 21 bobinas como se observa en la Tabla VI, 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. Bajo esta condición se presentan los siguientes resultados:

- Tiempo = 402,5 minutos
- Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad = 21 bobinas
- Indicador de abastecimiento de la demanda = 100%

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. Bajo esta condición se presentan los siguientes resultados:

- Tiempo = 435,0 minutos
- Cantidad de bobinas aprobadas por las pruebas de control de calidad = 23 bobinas
- Indicador de abastecimiento de la demanda = 109,52%

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 también 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.

TABLA V
 RESULTADOS DEL MODELO OPTIMIZADO (TÉCNICAS LEAN Y TOC S-DBR) PARA EL PRIMER ESCENARIO Y SUS 16 ESTRATEGIAS

| ESCENARIO 1: DEMANDA = 20 [Bobina] | | | | | RESPECTO A UNA JORNADA DE TRABAJO | | |
|--|--|------------------------|---|--|-----------------------------------|---|--|
| 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 4: Resultados del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR) para el primer escenario y sus 16 estrategias
 Fuente: Elaboración propia

TABLA VI
 RESULTADOS DEL MODELO OPTIMIZADO (TÉCNICAS LEAN Y TOC S-DBR) PARA EL SEGUNDO ESCENARIO Y SUS 16 ESTRATEGIAS

| ESCENARIO 2: DEMANDA = 21 [Bobina] | | | | | RESPECTO A UNA JORNADA DE TRABAJO | | |
|--|--|------------------------|---|--|-----------------------------------|---|--|
| 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 5: Resultados del modelo optimizado (técnicas Lean y TOC S-DBR) para el segundo escenario y sus 16 estrategias
 Fuente: Elaboración propia

V. CONCLUSIONES

Mediante la aplicación de técnicas Lean y TOC (Simplified-DBR) al modelo descrito en el proceso metodológico que está basado en dinámica de sistemas se ha podido simular diferentes escenarios. Los resultados de la simulación demuestran que se puede reducir el tiempo de los procesos de pruebas en el laboratorio de control de calidad de bobinas de alambre esmaltado.

Los tiempos improductivos detectados al ejecutar la simulación según el diagrama causal inicial mostrado en la Figura 4, fueron de aproximadamente 29 minutos en los cuales el empleado descansa por el cambio del ciclo de las pruebas.

Se compararon los resultados de los dos escenarios (Tabla V y Tabla VI) respecto al escenario inicial (Tabla IV), 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 IV, 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.

Según la Tabla V, con $B^* = 23$ bobinas diarias, se mejoró un 9,52% la productividad del supervisor en $t^* = 435,0$ min., reduciendo el tiempo de descanso por cambio de ciclo a la cuarta parte y aumentando tres bobinas más a las pruebas.

V. REFERENCIAS

- [1] Ekos. (2015). Obtenido de El Portal de Negocios del Ecuador: <http://www.ekosnegocios.com/Empresas/RankingEcuador.aspx>
- [2] Narvarte, J., Mardones, V., González, M., Vicuña, I., Arévalo, F., Gorigoitía, 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>
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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>
- [6] 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*.
- [7] Arias Odon, F. G. (1999). *El Proyecto de Investigación: Guía para su elaboración* (Tercera ed.). Caracas, Venezuela: Editorial Episteme, C.A. / Oriol Ediciones.
- [8] Caselles Moncho, A. (2008). *Modelización y simulación de sistemas complejos*. Publicaciones de la Universitat de València.
- [9] Electrocables C.A. (16 de Septiembre de 2010). Catálogos de Productos. ELECTROCABLES C.A.
- [10] *Electrocables C.A.* (28 de Julio de 2016). Obtenido de <http://electrocable.com/>
- [11] 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
- [12] 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
- [13] Luzardo Mota , H. E. (1 de Julio de 2014). Propuesta para mejorar el proceso de producción de alambre esmaltado en la empresa Electrocables C.A. *Propuesta para mejorar el proceso de producción de alambre esmaltado en la empresa Electrocables C.A.*, 142-143. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Industrial. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/4433>
- [14] Morles, V. (1994). *Planeamiento y análisis de investigaciones* (Octava ed.). Caracas, Venezuela: El Dorado.
- [15] 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
- [16] Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. New York, United States of America: McGraw-Hill.
- [17] *System Dynamics Society*. (s.f.). Obtenido de <http://www.systemdynamics.org/what-is-s/#approach>
- [18] Wixson, J. R., & Mills, J. I. (s.f.). *A System Dynamics View of the Theory of Constraints*.