

Simulación de la dinámica de un almacén distribuidor de equipos de medida de energía eléctrica destinada al consumo*

Rocío Alfaro¹, Lourdes Perpiñán¹, Joaquín Bautista¹, Rubén Rami¹

¹ Dpto. de Organización de Empresas. ETSEIB. UPC. Avda. Diagonal 647, 08025 Barcelona.
{[rocio.alfaro](mailto:rocio.alfaro@upc.edu), [lourdes.perpinan](mailto:lourdes.perpinan@upc.edu), [joaquin.bautista](mailto:joaquin.bautista@upc.edu), [ruben.rami](mailto:ruben.rami@upc.edu)}@upc.edu

Palabras clave: Simulación, recursos humanos, stocks, distribución eléctrica.

1. Introducción

La electricidad (del griego elektron, cuyo significado es ámbar) es un fenómeno físico cuyo origen son las cargas eléctricas y cuya energía se manifiesta en fenómenos mecánicos, térmicos, luminosos y químicos, entre otros.

Su importancia radica en que es una de las principales formas de energía usadas en el mundo actual. Sin ella la iluminación, las comunicaciones, el abastecimiento de alimentos, y la mayor parte de los agrados y servicios de los hogares, oficinas y fábricas de nuestros días no existirían. De ahí que consumo de electricidad y vida moderna sean prácticamente sinónimos en el mundo industrializado.

Es por este motivo que existen grandes empresas a nivel mundial dedicadas al sector eléctrico. Un ejemplo de estas empresas es ENDESA que es la primera compañía eléctrica de España y la principal empresa eléctrica en Chile, Argentina, Colombia y Perú y está presente en Brasil.

La actividad de Endesa se estructura por líneas de negocio, lo que le permite actuar con agilidad en los mercados en los que opera y tener en cuenta las necesidades de sus clientes en los territorios y negocios en los que se halla presente. Así, Endesa se divide en dos grandes direcciones generales: Dirección General de España y Portugal; y Dirección General de Latinoamérica. De estas direcciones generales dependen diferentes sociedades jurídicamente independientes que son las que atienden las necesidades de cada territorio. Endesa España y Portugal está integrada por las siguientes sociedades (Endesa Business Line (2010)): (1) Endesa Generación; (2) Endesa Energía; (3) Endesa Servicios y (4) Endesa Red.

Dentro de la sociedad Endesa Red, se encuentran dos sociedades más, Endesa Operaciones y Servicios Comerciales, S.L., y Endesa Distribución Eléctrica, S.L. Es esta última la encargada

* El presente trabajo ha sido financiado parcialmente por la Cátedra Nissan UPC y el proyecto PROTHIUS-III (DPI2010-16759) del Gobierno de España, incluyendo fondos FEDER.

de una de las actividades más importantes para las compañías de electricidad: la distribución de energía eléctrica a los clientes y la tarificación del consumo. Para estas actividades, se utilizan equipos de medida energética, como contadores, módems y transformadores de intensidad y/o tensión, según las características del suministro, que permitan al cliente el uso de la energía y a la compañía la facturación del consumo de kilowatios. De ahí la necesidad de almacenes encargados de la distribución y gestión de estos equipos, cuya función repercute directamente en la economía de la empresa y en la calidad de servicio ofrecida al cliente en costes y tiempos de espera.

Existen varios métodos de análisis y evaluación para el estudio y mejora de procesos, entre ellos la simulación. Tras establecer un modelo, la simulación es la representación visual de la evolución de un sistema real o experimento (Law (2007)). Así, la simulación constituye un conjunto de aproximaciones estructuradas, cuantitativas y cualitativas, sobre el comportamiento de cualquier sistema. Ejemplos del uso de esta metodología ya se pueden encontrar en el sector eléctrico, entre otros, para explorar y evaluar la viabilidad de sistemas de cogeneración basados en motores Stirling (Lombardi et al. (2010)).

En este trabajo analizamos, mediante simulación, los flujos de los equipos de medida que tienen lugar en un almacén distribuidor de Cataluña (Alfaro y Perpiñán (2010)). Además, definimos algunas propuestas de mejora para aumentar la satisfacción del cliente sin perjudicar los intereses de la empresa.

La estructura de este manuscrito es la siguiente: En el epígrafe 2, se describe el problema, definiendo el sistema objeto de estudio y los objetivos que se quieren alcanzar. En el epígrafe 3 se presentan los experimentos realizados, mediante la simulación, y los resultados obtenidos. Finalmente, en el epígrafe 4 se analizan los resultados obtenidos y se exponen las conclusiones del trabajo.

2. Descripción del problema

En el presente trabajo, estudiamos la dinámica de un almacén distribuidor de equipos de medida de energía eléctrica, perteneciente a Endesa, concretamente a la línea de negocio Endesa Distribución Eléctrica.

El almacén objeto de estudio, situado en Cataluña, tiene como función principal el suministro de contadores y demás equipos de medida, a los clientes que, dentro del territorio catalán, lo soliciten. Dentro de esta función de distribución se desarrollan las siguientes tareas:

- Gestión de las solicitudes de los diferentes tipos de equipos de medida: contadores de alta y baja tensión, transformadores de intensidad, módems GPRS y tarjetas GPRS.
- Programación de los contadores.
- Control de calidad los contadores, transformadores y módems (FECSA Endesa, Responsable de Calidad (2004)).
- Suministro de módems GPRS para la campaña de sustitución de módems GPS.
- Gestión y control de stocks.

El almacén, con recursos suficientes para desarrollar cada una de las tareas, contrataba a una empresa externa la programación de los contadores. Esto provocaba un aumento en los tiempos de servicio de las solicitudes, un aumento de costes y una infrautilización en los recursos propios del almacén. Por este motivo, y bajo la premisa del importante papel que juega el almacén para la compañía, tanto en costes como en calidad de servicio, formulamos dos objetivos. El primero de ellos, vinculado a la reducción de costes y a la optimización del uso de recursos, consiste en realizar un reparto equitativo de la carga de trabajo entre los técnicos internos capacitados para la realización de las diferentes tareas. Y el segundo, vinculado a la reducción de los tiempos de entrega de los equipos a los clientes, consiste en mejorar la gestión de los stocks. Concretamente, estos objetivos son:

- Eliminar el 100% de los costes asociados a la contratación de parte del trabajo.
- Reducir el tiempo de entrega de los equipos en un 50%.

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos, primero fue necesario conocer el sistema objeto de estudio. Para ello se realizó una primera fase de conocimiento del sistema, en la que se recogieron los datos necesarios para poder realizar, posteriormente, un modelo simplificado del almacén, identificando los principales agentes que intervienen y la relaciones que existen entre ellos.

A partir del modelo conceptual del sistema del almacén, se pasó al desarrollo informático del estudio. Para ello se empleó la aplicación ARENA (Altiok et al. (2007)). Esta herramienta de modelación de sistemas y simulación de la evolución temporal de los mismos, permitió detectar los puntos críticos del escenario inicial y orientó nuestras propuestas de mejora hacia la consecución de los objetivos definidos.

3. Diseño de experimentos

Una vez modelado el sistema del almacén distribuidor y tras su validación y verificación, se detectó que los principales problemas eran la existencia de roturas de stocks de los equipos y el desaprovechamiento y desequilibrio de los recursos humanos disponibles.

Por este motivo, y teniendo en cuenta los objetivos definidos para el estudio, de mejorar el servicio al cliente y reducir costes, se realizaron dos experimentos consecutivos y relacionados entre sí. Estos experimentos son:

- Experimento 1: cuyo objetivo es la reducción del número de roturas en los stocks de los equipos de medida del almacén.
- Experimento 2: cuyo objetivo es la racionalización de los recursos humanos de la empresa, equilibrando las cargas de trabajo mediante la reasignación de operaciones.

Para cada uno de los experimentos inicialmente definidos, se simularon diferentes escenarios con el fin de ir controlando en todo momento las variables del sistema y alcanzando los objetivos propuestos. En concreto, para el experimento 1 se simularon consecutivamente, además del estado inicial del sistema (E0), cuatro escenarios más (E1, E2, E3 y E4), controlando en cada uno de ellos el impacto de los niveles de seguridad y los tamaños de lote de los equipos de medida más problemáticos.

Por su parte, el experimento 2, cuyo escenario de partida se correspondía con el último del experimento 1 (E4), se desglosó en siete escenarios distintos y consecutivos (E5, E6, E7, E8, E9, E10 y E11), en los que se controlaba la reasignación de operaciones, las cargas de trabajo y los tiempos de ejecución. A continuación se describen con más detalle cada uno de los experimentos realizados.

3.1. Experimento 1

A partir de los valores de los parámetros de control, obtenidos tras el análisis de datos del almacén, se realizó una simulación inicial (E0) para conocer el número de roturas que se producían en el sistema. Al ver los resultados obtenidos y teniendo en cuenta que algunos equipos, como eran los módems y tarjetas, no admitían roturas, se fijaron unos objetivos específicos para este experimento, con el propósito de reducir en un 67% el número total de roturas producidas en el sistema. Además, con el fin de no aumentar los costes de almacenamiento, se mantuvieron los niveles de stock máximo y medio para cada uno de los equipos. Los objetivos específicos para este experimento fueron:

- Reducir las roturas de contadores de alta tensión en el almacén a 6 roturas/año.
- Mantener las roturas de contadores de baja tensión en el almacén en 2 roturas/año.
- Mantener las roturas de contadores de baja tensión en el almacén en 2 roturas/año.
- Mantener las roturas de tarjetas en el almacén en 0 roturas/año.
- Reducir las roturas de módems en el almacén a 0 roturas/año.
- Mantener las roturas de transformadores en el almacén en 0 roturas/año.
- Reducir las roturas de contadores de baja tensión de la empresa contratada a 10 roturas/año.
- Reducir las roturas de transformadores de la empresa contratada a 3 roturas/año.

Se simularon cuatro escenarios de forma consecutiva. En cada uno de ellos, se modificaron los parámetros de control correspondientes a algunos equipos, asignándoles los valores de la Tabla 1, de tal forma que a medida que se avanzaba en la simulación de un nuevo escenario se añadían las nuevas modificaciones:

- Escenario 1 (E1): destinado a controlar el stock de los módems (M) y tarjetas (T).
- Escenario 2 (E2): destinado a controlar el stock, tanto el del almacén (i) como el de la empresa contratada (e), de los contadores de baja tensión (B).
- Escenario 3 (E3): destinado a controlar el stock, tanto el del almacén (i) como el de la empresa contratada (e), de los transformadores (Tr).
- Escenario 4 (E4): destinado a controlar el stock de los contadores de alta tensión (A).

Tabla 1. Experimento 1. Se recogen los valores asignados a los parámetros de control en forma de terna x/y/z, donde “x” adopta el valor “s” (nivel de seguridad) o “Q” (tamaño de lote); “y” adopta el valor “M” (modems), “T” (tarjetas), “B” (contador de baja tensión), “A” (contador de alta tensión) o “Tr” (trafo); y “z” adopta el valor “i” (interno) o “e” (externo).

Parámetro	E0	E1	E2	E3	E4
s/M/i	2460	3400	3400	3400	3400
s/T/i	300	780	780	780	780
s/B/i	152	152	160	160	160
s/A/i	125	125	125	125	220
s/Tr/i	168	168	168	200	200
s/B/e	20	20	100	100	100
s/Tr/e	9	9	9	40	40
Q/M/i	1000	3500	3500	3500	3500
Q/T/i	1000	1000	1000	1000	1000
Q/B/i	1600	1600	1600	1600	1600
Q/A/i	280	280	280	280	250
Q/Tr/i	432	432	432	432	432
Q/B/e	45	45	100	100	100
Q/Tr/e	30	30	30	80	80

Finalmente, con el escenario 4 se alcanzaron los objetivos específicos definidos al inicio del experimento, reduciendo y/o manteniendo el número de roturas (Figura 1) y manteniendo los niveles de stock medio (Figura 2) y máximo (Figura 3) de los equipos de medida.

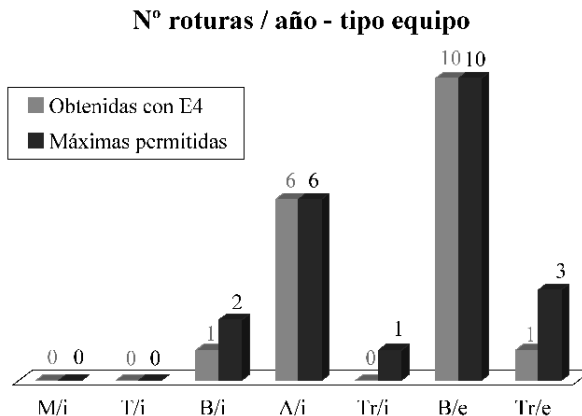


Figura 1. Número de roturas/año obtenidas tras el experimento 1 y máximas permitidas en cada uno de los equipos de medida.

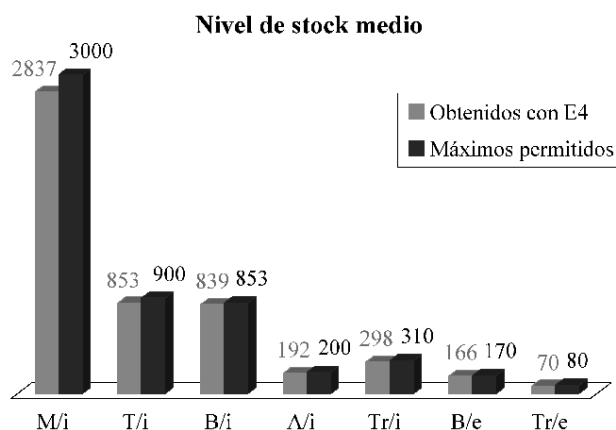


Figura 2. Nivel de stock medio correspondiente a los resultados del experimento 1 y a los objetivos de cada tipo de equipo de medida (horizonte de un año).

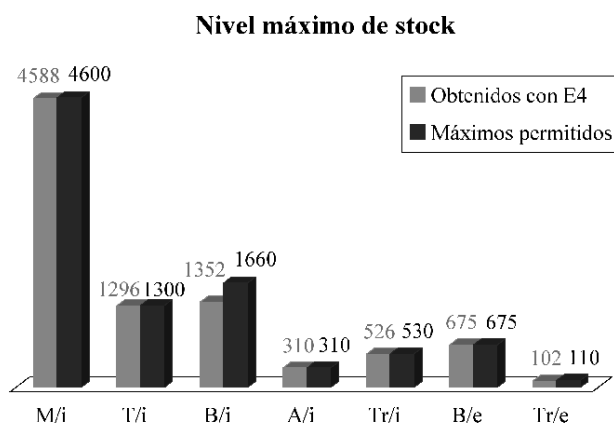


Figura 3. Nivel de stock máximo correspondiente a los resultados del experimento 1 y a los objetivos de cada tipo de equipo de medida (horizonte de un año).

3.2. Experimento 2

Con los stocks controlados, se pasó al segundo problema detectado en la simulación inicial del sistema, el desequilibrio de las cargas de trabajo y la infrautilización de los recursos. Para ello, a partir de los datos procedentes de la simulación del escenario 4, se realizó una reasignación de tareas, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Algunos recursos no se consideran debido a que realizan sus funciones fuera del sistema objeto de estudio.
- Los recursos humanos de la empresa contratada, no se tienen en cuenta pues quedan fuera de los límites del sistema almacén.

- A la hora de reasignar las tareas se tiene en cuenta, las características de la misma, los requisitos que debe reunir la persona que la lleve a cabo y el tiempo de aprendizaje requerido para cada una de ellas.
- En todo momento, la resignación de tareas, no puede afectar negativamente al tiempo medio de servicio de las solicitudes que reciba el almacén, manteniendo o mejorando así la calidad del servicio de cara al cliente.

Del mismo modo que en el experimento 1, en éste también se simularon diferentes escenarios consecutivos:

- Escenario 5 (E5): destinado a equilibrar la carga de trabajo de los recursos disponibles en el almacén, reasignando las tareas.
- Escenario 6 (E6), Escenario 7 (E7) y Escenario 8 (E8): diseñados con la intención de mejorar la productividad de los recursos propios del almacén. El objetivo de la simulación de estos escenarios era conocer el mínimo número de recursos necesarios para realizar el trabajo del almacén, sin que las modificaciones afectaran a la calidad del sistema en cuanto a tiempos de servicio. En cada uno de ellos se fue prescindiendo de un recurso, finalizando el escenario 8 con la reducción de tres unidades de recurso.
- Escenario 9 (E9): su objetivo era la absorción, por parte del almacén, de todo el trabajo contratado a la empresa externa.
- Escenario 10 (E10): con el 100% del trabajo asignado al almacén, re-incorporación de una unidad de recurso con el objetivo de reducir los tiempos de servicio y equilibrar las cargas del sistema.
- Escenario 11 (E11): re-incorporación de las dos unidades de recursos reducidas en E6 y E7 con el fin de que el almacén pueda llevar a cabo el 100% del trabajo solicitado y se reduzca el tiempo de servicio de las solicitudes, equilibrando las cargas de trabajo entre todos los recursos disponibles del almacén.

Una vez resignadas las tareas con el fin de equilibrar la carga de trabajo de los recursos disponibles en el almacén, se simuló el escenario 5. Los resultados obtenidos, fueron una repartición equitativa de la carga de trabajo entre los trabajadores pero una gran infrautilización de los mismos, pues estaban ocupados una media del 40% de la jornada laboral. Además, la reasignación hecha redujo en un 57% el tiempo medio de servicio.

En vista de la escasa productividad de los recursos, en los siguientes tres escenarios simulados (E6, E7 y E8) se fue reduciendo unidad a unidad la plantilla. De esta manera observamos que prescindiendo de 3 operarios, podíamos alcanzar un factor medio de utilización del 52% sin aumentar los tiempos medios de servicio respecto al escenario inicial de este experimento (E4).

Aún prescindiendo de tres de los recursos del almacén, teníamos capacidad suficiente para absorber el trabajo que se contrataba a una empresa externa y por ello se simuló E9. La asignación del 100% del trabajo solicitado al almacén, manteniendo la reducción de los recursos realizada en simulaciones anteriores, dio como resultado una mayor utilización del

los recursos, de 67,5%, pero un mayor desequilibrio entre las cargas, siendo la carga máxima de 92,62% y la mínima de 45,35%.

Debido al desequilibrio en la utilización de los recursos que produjo la realización de todo el trabajo por el almacén y teniendo en cuenta que la política de empresa del momento no contemplaba la reducción de plantilla, se simularon dos escenarios más, E10 y E11, en los que se re-incorporaron dos de los recursos y posteriormente el tercero.

Además, en el escenario 11 se consiguió que el almacén, utilizando los recursos disponibles, fuera capaz de asumir todo el trabajo, alcanzando unos tiempos medios de servicio de 22,52 horas/año-solicitud y una utilización media de 48,9 %, lo que supone un aumento de la eficiencia del sistema. Además con la absorción, por parte del laboratorio del 100% del trabajo, se han conseguido reducir costes. En la Tabla 2 se recogen los resultados obtenidos.

Tabla 2. Experimento 2. Se recogen los resultados de cada uno de los escenarios simulados, pertenecientes al experimento 2 (E5, E6, E7, E8, E9, E10 y E11) y el escenario de partida (E4) correspondiente al escenario final del experimento 1.

Parámetro	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11
Tiempo medio servicio (horas/año)	56,02	31,83	38,35	40,89	41,745	37,445	38,705	22,52
Utilización media recursos (%)	38,9	36,1	42,2	47,6	52,4	67,5	57,3	48,9
Utilización máxima recursos (%)	86,58	45,82	65,61	63,2	63,56	92,62	86,24	61,56
Utilización mínima recursos (%)	3,16	20,84	30,62	33,51	42,31	45,34	39,5	37,2

4. Análisis de resultados y conclusiones

A lo largo del presente trabajo se ha estudiado, mediante simulación, el comportamiento del sistema que conforma el almacén de distribución de equipos de medida energética de la empresa Endesa, situado en Cataluña.

El trabajo que se lleva a cabo en este tipo de almacenes es importante para la compañía eléctrica, ya que una buena o mala gestión de los equipos de medida, repercute directamente en el servicio que se le ofrece al cliente, tanto en calidad, como en coste, como en tiempo. Por este motivo en el estudio se han propuesto una serie de mejoras con la finalidad de reducir los tiempos de entrega y reducir costes.

Se realizaron dos experimentos consecutivos: el primero, para mejorar el sistema productivo, se orientó a la reducción de roturas de stocks, y el segundo, para racionalizar los recursos humanos, se destinó al equilibrado de las cargas de trabajo.

Además del estado inicial (E0), se simularon 11 escenarios. En los escenarios E1 a E4 (experimento-1) se controló el impacto de los niveles de seguridad y los tamaños de lote. En el experimento-2 (E5 a E11) se controló la asignación de tareas y la utilización de recursos

humanos. En la tabla 3 se resumen cada uno de los escenarios simulados, indicando el fin concreto de cada uno de ellos.

Tabla 3. Resumen de los escenarios simulados E0 a E11.

Esc	Modificación	Resultados
E0	Estado de partida	Roturas de stocks; Desequilibrio de cargas de trabajo
E1	s/M /i= 3.400; s/T/i = 780 Q/M/i = 3.500	Eliminación de roturas de stocks de módems y tarjetas; Desequilibrio de cargas de trabajo
E2	s/B/i = 160; s/B/e = 100 Q/B/e = 100	Reducción de roturas de stocks de contadores de baja tensión; Desequilibrio de cargas de trabajo
E3	s/Tr/i= 200; s/Tr/e = 40 Q/Tr/e= 80	Reducción de roturas de stocks de transformadores; Desequilibrio de cargas de trabajo
E4	s/A/i = 220	Reducción de roturas de stocks de contadores de alta tensión; Desequilibrio de cargas de trabajo
E5	Reasignación de tareas	Cargas de trabajo equilibradas; Recursos infrautilizados.
E6,E7 E8	Eliminación de recursos	Cargas de trabajo equilibradas; Mayor utilización de recursos pero con capacidad remanente.
E9	Absorción de los trabajos externalizados	Eliminación de costes de contratación; Aumento de los tiempos de servicio
E10 E11	Reincorporación de los recursos suprimidos	Eliminación de costes de contratación; Disminución de los tiempos de servicio

Con los diferentes escenarios simulados en los dos experimentos, los resultados finales obtenidos son:

- Reducción del tiempo medio de entrega de las solicitudes de equipos de un 63,72%. (Figura 3).

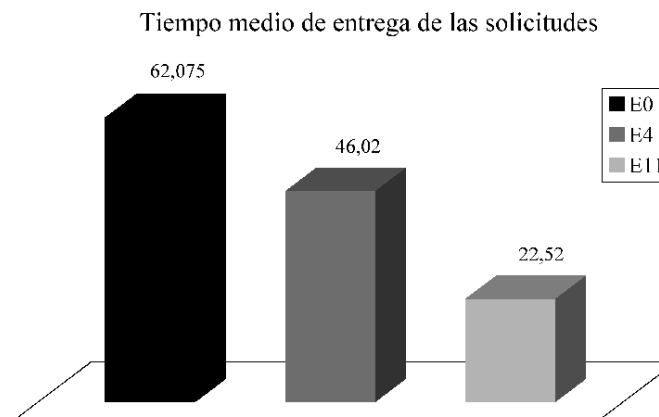


Figura 3. Tiempo medio de entrega de las solicitudes (horas/año-solicitud) en los escenarios E0, E4 y E11.

- Internalización del 100% de los trabajos externos contratados.
- Racionalización y equilibrado de las cargas de trabajo.

Como se observa, con los experimentos realizados se ha conseguido alcanzar los objetivos definidos. Por un lado se ha conseguido reducir el tiempo medio de entrega de las solicitudes un 63,72%, valor superior al 50% esperado. Mientras que por otro lado se han reducido los

costes del sistema mediante dos vías. La primera, al asumir el 100% de las solicitudes y no subcontratarlas y la segunda reduciendo el número de roturas que se producen en los diferentes stocks. Además se ha conseguido equilibrar, entre los recursos disponibles, la carga de trabajo, aumentando la eficiencia sin reducciones de plantilla, respetando así la política de y los intereses de la empresa.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración prestada por Nissan Spanish Industrial Operations (NSIO). El presente trabajo ha sido financiado parcialmente por la Cátedra Nissan UPC y el proyecto PROTHIUS-III (DPI2010-16759) del Gobierno de España, incluyendo fondos FEDER.

Referencias

Alfaro, R.; Perpiñán, L. (2010). Modelado y simulación de un almacén distribuidor de equipos de medida energética. Proyecto final de carrera ETSEIB UPC. (www.nissanchair.com)

Altiok, T.; Melamed, B. (2007). Simulation Modeling and Analysis with ARENA. Academic Press.

Law, A.M. (2007). Simulation Modeling and Analysis. 4th ed. McGraw-Hill series in Industrial Engineering and Management Science.

Lombardi, K.; Ugursal, V.I.; Beausoleil-Morrison, I. (2010). Proposed improvements to a model for characterizing the electrical and thermal energy performance of Stirling engine micro-cogeneration devices based upon experimental observations. Applied Energy, Vol. 87, No. 10, pp. 3271-3282.