

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106

**MEMORIA**

---

**INVESTIGACIONES  
EN INGENIERÍA**

**Nº 19**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**



# MEMORIA

*Investigaciones en Ingeniería*

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106

**Núm. 19**

**(2020)**

---

## *Índice*

*Págs.*

### **Editorial – La relevancia de la investigación**

Martín Tanco

**1**

### **Modelo de decisión para determinar fuentes de retorno, incentivos y capacidad en un sistema de remanufactura**

*Decision model to determine the return sources, incentives, and capacity in a remanufacturing system*

Alex J. Ruiz-Torres, Daniel Jurburg, Yarlier López-Correa

**2-24**

### **Recolección y análisis de datos en el ámbito de la eficiencia energética eléctrica**

*Data collection and análisis for electric energy efficiency*

Hernán Santiso, Martín Salamero, Cristian Novarino

**25–42**

### **Sistema de reconocimiento de señalamientos en entornos abiertos para la orientación de personas con discapacidad visual**

*Signage Recognition System in Open Environments for the Visually Impaired*

Yesenia González, Alejandro Millán, Yuli Sánchez, Claudia Ortiz, Miguel Alemán, Carlos Hernández

**43-62**

### **4BeGreen: Metodología para motivar la conciencia ambiental, la valorización y prevención de residuos en empresas de servicios**

*A methodology to encourage environmental awareness for recovery, and prevention of waste in service companies*

Luis Eduardo Cañón-Ramirez, Vanessa Prieto-Sandoval

**63–75**

## **Editorial – La relevancia de la Investigación**

Les presento con placer la edición número 19 de la revista Memoria de Investigaciones en Ingeniería, que se ha venido publicando de manera sostenida desde el año 2000. Este año ha sido un año atípico, distinto, lleno de desafíos para cada uno de nosotros y también lo fue para Memoria. Desde sus comienzos, la revista ha tenido un crecimiento sostenido en cada una de las ediciones anuales. Este año nos planteamos el desafío de tener dos ediciones anuales. Al principio, pareció difícil, arriesgado, pero al igual que la sociedad logró unirse para enfrentar los cambios que hemos experimentado en estos tiempos de caos, el esfuerzo de los autores, revisores y del consejo editorial lo hicieron posible.

La pandemia ocasionada por el COVID-19 ha generado muchos efectos negativos, por el número de fallecidos a nivel mundial, así como la pérdida de trabajo y cierre de muchas empresas. Pero también, ha mostrado varios efectos positivos, algunos de ellos destacados en los medios nacionales e internacionales, como la importancia y relevancia de la investigación científica para el desarrollo de la sociedad. Se ha demostrado el valor de los investigadores, en distintas áreas del saber, que mediante su trabajo diario y en algunos casos honorario, han ayudado a superar de la mejor manera posible esta pandemia. También la pandemia nos ha hecho reflexionar que las principales causas de contagio (y que debemos evitar en esta etapa) radican en aquellos actos simples e importantes de nuestra vida, y como sin ellos se nos dificulta ser plenamente humano. Un abrazo, juntarse con amigos, festejar la Navidad rodeada de toda la familia extendida, poder trabajar en conjunto con el equipo, asistir a actividades culturales y espirituales. Todo esto es lo que debemos evitar pero que ansiamos volver a realizar. Es momento de valorar las acciones cotidianas del día a día.

A su vez, este año la Facultad de Ingeniería con el deseo de seguir creciendo ha firmado un acuerdo con el parque tecnológico LATU para mudar sus instalaciones e instalarse en el predio. El LATU está integrado por una comunidad de empresas y organizaciones tanto públicas y privadas vinculadas a la tecnología, la educación, el emprendedurismo, la innovación y la investigación. Esto permitirá fortalecer la relación y trabajo de la Facultad con las empresas que día a día lleva a cabo.

En esta edición de la revista Memoria de Investigaciones en Ingeniería se combinan trabajos tan variados como el desarrollo de un prototipo que permite identificar señalamientos en entornos abiertos para la orientación de personas con discapacidad visual hasta un modelo de decisión para determinar fuentes de retorno, incentivos y capacidad en un sistema de remanufactura. A su vez, se tratan temas relacionados a la eficiencia energética y la valorización y prevención de residuos en empresas de servicios.

Por último, quisiera agradecer y destacar que esta edición es fruto del esfuerzo y dedicación de Rodrigo Sanchez quién lanzó la convocatoria y fue encargado de la edición y comunicación con los autores, y del apoyo de la Lic. Valentina Morandi quien brindó los servicios de biblioteca de la Universidad de Montevideo. Por primera vez, hemos podido ingresar la revista en el catálogo 2.0 de Latindex.

Martin Tanco, PhD.  
Director Editor  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de Montevideo**

Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 19 (2020)  
<https://doi.org/10.36561/ING.19.1>  
ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106

# Modelo de decisión para determinar fuentes de retorno, incentivos y capacidad en un sistema de remanufactura

*Decision model to determine the return sources, incentives, and capacity in a remanufacturing system*

---

Alex J. Ruiz-Torres<sup>1</sup>, Daniel Jurburg<sup>2</sup>, Yarlier López-Correa<sup>3</sup>

Recibido: Enero 2020

Aceptado: Agosto 2020

---

**Resumen.-** Esta investigación propone un modelo de decisión para gestionar la compra de componentes nuevos y usados en un sistema de manufactura. Los componentes nuevos se adquieren de un proveedor el cual ofrece descuentos que dependen de la capacidad reservada. Los componentes usados provienen de varias fuentes, donde la cantidad que se recibirá de cada fuente depende del incentivo suministrado. El modelo considera dos elementos estocásticos, el nivel de retorno por fuente (para componentes usados) y la posibilidad de que no se reciba el envío del proveedor de componentes nuevos. Se realiza un análisis de sensibilidad basándose en un ejemplo numérico. Los resultados demuestran relaciones significativas entre los costos de operación de las fuentes de retorno, la probabilidad de retornos bajos y el número de fuentes usadas, y el nivel de incentivo asignado por fuente. Los experimentos también indican como los incentivos y la capacidad reservada dependen de la probabilidad de que no se reciban las unidades nuevas. La aplicación en la práctica del modelo y de los resultados apoyaría a que las empresas con sistemas de remanufactura de componentes seleccionen el mejor nivel de incentivos a ofrecer, determinar su capacidad y decidir cuales fuentes de retornos usar de manera minimicen sus costos totales.

**Palabras clave:** Cadena de suministro; ciclo cerrado; logística inversa; incentivos; remanufactura; proveedores.

**Summary.-** This research proposes a decision model to manage the purchase of new and used components in a re-manufacturing system. New components are purchased from a supplier who offers discounts based on the reserved capacity. The used components comes from various sources, where the quantity to be received from each source depends on the incentive provided. The model considers two stochastic elements: the return level per source (for used components) and the possibility that the shipment of new components is not received. A sensitivity analysis is performed based on a numerical example. The results demonstrate significant relationships between the costs to operate the return sources, the probability of low returns, and the incentive levels assigned to each source. The experiments also indicate how the incentives and the reserved capacity depends on the probability that the new components are not received.

**Keywords:** Supply chain management; closed loop; reverse logistics; incentives; remanufacturing; suppliers.

---

<sup>1</sup>Facultad de Adm. de empresas, Universidad de Puerto Rico, alex.ruiztorres@upr.edu, ORCID iD: 0000-0002-7528-236X

<sup>2</sup>Facultad de Ing., Universidad de Montevideo, djurburg1@um.edu.uy, ORCID iD: 0000-0001-9226-1520

<sup>3</sup>Facultad de Adm. de empresas, Universidad de Puerto Rico, yarlier.lopez@upr.edu, ORCID iD: 0000-0002-2895-897X

**Introducción.-** Estudios sobre la logística inversa y las cadenas de suministro de ciclo cerrado (CSCC) son cada día más relevantes [1]. Esta relevancia surge a partir del constante progreso tecnológico, el cual resulta en que muchos productos tengan ciclos de vida más cortos (por ejemplo, copiadoras, automóviles, dispositivos médicos, equipos de construcción, computadoras, teléfonos celulares, etc.), lo cual conlleva en un número cada vez mayor de productos desechados. Los estudios enfocados en la logística inversa y las CSCC son críticos para la sustentabilidad de nuestro medio ambiente debido a que permiten el diseño de sistemas para la recuperación de productos desechados de manera que puedan ser “aprovechados”; por ejemplo, para reciclaje de materiales, reúso de sus componentes, o reparación y reventa del producto.

La cantidad y la calidad de los retornos es difícil de predecir y controlar [2-4]. Múltiples investigaciones indican que la incertidumbre asociada con los retornos es una de las principales características de las redes logísticas con recuperación de productos [5-7]. Esta incertidumbre requiere que los sistemas de CSCC dependan de una combinación de flujos de materiales usados, el llamado flujo inverso, y de materiales nuevos provenientes de proveedores tradicionales [8-10]. Es importante notar que la incertidumbre en los sistemas logísticos no está solamente relacionada a los productos retornados, pero también a posibles fallas de los proveedores de productos nuevos [11].

Los incentivos financieros son utilizados para incrementar los niveles de retornos en una gran variedad de productos [12-14]. El proveer incentivos hace más atractivo el retornar productos, sea pagando por cada producto retornado o proveyendo descuentos para reemplazos [15]. Es claro que para que los incentivos sean de beneficio al sistema, los ahorros asociados con los productos retornados tienen que sobrepasar los gastos de estos incentivos. La cantidad de retornos también está asociada con el sistema de recolección en sí mismo y el número de fuentes de retorno o acopio [16]. Cuanto mayor sea el número de fuentes y puntos de acopio mayor será la cantidad de retornos, pero de igual manera, los costos fijos y operacionales aumentarán.

En esta investigación se propone un modelo para la toma de decisiones en un sistema de manufactura donde se utilizan componentes nuevos y usados. La decisión asociada con los componentes nuevos es la capacidad (cantidad de unidades) a reservar del proveedor. El costo de reservación por unidad depende de la capacidad total reservada, donde hay un descuento por reservar mayores cantidades. Durante cada ciclo, la cantidad adquirida del proveedor tiene que ser menor o igual a la cantidad reservada. Las decisiones asociadas con los componentes usados son acerca de cuáles fuentes serán utilizadas y el incentivo provisto a cada fuente. Cada fuente tiene características diferentes en términos de las posibles cantidades a ser retornadas y los costos de los incentivos.

El modelo considera dos elementos estocásticos. El primero establece que existe la probabilidad en cada ciclo de que no se reciban las unidades requeridas al proveedor, sea por razones internas como la falla de equipo crítico o un problema de calidad, o causas externas como un desastre natural, una huelga en los muelles que manejan el embarque, etc. El segundo establece que la cantidad recibida de cada fuente de retornos varía. Se asume que cada fuente de retorno tiene múltiples niveles de retorno, donde la cantidad recibida y la probabilidad de estos niveles está relacionada con los incentivos. La combinación de los niveles de retorno resulta en un conjunto de posibles escenarios, cada uno con diferentes cantidades de retornos por fuente. En cada escenario se considera ambas situaciones en relación con las unidades nuevas, si se reciben o no.

Durante cada escenario se determina la cantidad recibida de cada fuente de retorno, esto representa al total de unidades usadas disponibles para remanufactura y reúso. El modelo asume que la demanda por ciclo siempre es mayor que este total, por lo que nunca quedaría inventario de

unidades usadas para un ciclo futuro. Además, esto significa que en todos los ciclos es necesario comprar unidades nuevas (limitado por la cantidad reservada). Además, en el caso de que la suma del total de unidades usadas disponibles y las nuevas compradas al proveedor sea menor que la demanda, se incurre en un costo de pérdida. Este costo se relaciona con no poder cumplir con la demanda, lo que resulta en pérdida de ganancias o pérdida de clientes.

El modelo considera seis costos, dos costos fijos y cuatro costos variables que dependen de los diferentes escenarios de devolución de las fuentes de retorno. Los dos costos fijos son el costo de reservar capacidad para el proveedor y el costo asociado con cuales fuentes de retornos se utilizan. Los cuatro costos variables son el costo de remanufactura, el costo de incentivos, el costo de unidades nuevas adquiridas, y el costo de pérdidas. El objetivo es la minimización de los costos totales y se utiliza un árbol de decisión para determinar los costos totales esperados en función de todos los escenarios de devolución posibles.

Esta investigación expande el trabajo de Ruiz-Torres *et al.* [17] considerando los siguientes elementos: a) múltiples fuentes de retorno y la decisión sobre qué fuentes de retorno utilizar, b) cada fuente de retorno tiene cantidades de devolución aleatoria, c) la decisión sobre qué capacidad reservar considerando descuentos, d) incertidumbre en la entrega del proveedor, e) incentivos que tienen un efecto en la cantidad de devolución por fuente de retorno y f) costos de pérdida al no poder satisfacer la demanda. Los elementos incluidos en esta versión son relevantes porque sirven para caracterizar diferentes sistemas asociados con el retorno de componentes, en particular cuáles fuentes de retorno utilizar. Esto representa por ejemplo áreas geográficas donde se recogería el producto usado, o tipos de productos donde se utiliza el componente.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 examina la literatura pertinente y la sección 3 presenta el modelo propuesto incluyendo un ejemplo numérico. La sección 4 presenta un análisis de sensibilidad. Por último, la Sección 5 proporciona conclusiones e indicaciones para futuras investigaciones.

**2. Revisión de la literatura.-** La revisión de literatura se enfoca en dos temas principales que sirven de base para el modelo propuesto y el análisis de esta investigación. Estos dos temas son los modelos de redes de CSCC y los modelos de selección y asignación de órdenes a proveedores.

**2.1. Modelo de redes CSCC.-** Existe una gran variedad de investigaciones relacionadas con el diseño de redes CSCC y los modelos de logística inversa. Entre los autores que han estudiado y analizado la literatura sobre el diseño de redes y los modelos de logística inversa se encuentran Govidan y Soleimani [1], Coenen *et al.* [4], Govindan *et al.* [18], Braz *et al.* [19] y De Giovanni y Zaccour [20]. Todas estas revisiones de literatura caracterizan estudios anteriores para determinar áreas de relevancia y factores importantes, además de proponer temas donde hacen falta más investigaciones.

Múltiples autores han estudiado la incertidumbre en la demanda, los retornos y la calidad de los retornos. Pishvae *et al.* [2] propusieron un modelo de programación lineal para una CSCC considerando un solo período y con etapas múltiples que aborda las actividades de recuperación y eliminación para gestionar las incertidumbres con respecto a la cantidad y calidad de los productos retornados. El-Sayed *et al.* [21] propusieron una red de CSCC de varios períodos y múltiples niveles considerando la demanda incierta de los clientes y las devoluciones de productos. Zeballos *et al.* [22] desarrollaron una formulación MILP (“Mixed Integer Linear Program”) de dos etapas para una red CSCC que aborda simultáneamente las decisiones de diseño y planificación en un sistema con cantidades y calidad inciertas. Benedito y Corominas [3] desarrollaron un modelo donde las tasas de retorno dependen de la demanda, el ciclo de vida del producto y la tasa de

retorno. Cardoso *et al.* [24] propuso un modelo MILP para abordar las decisiones de diseño y planificación teniendo en cuenta simultáneamente las actividades de producción, distribución y logística inversa bajo la condición de incertidumbre de la demanda. Zeballos *et al.* [25] presentaron una formulación para abordar una red general de CSCC de múltiples períodos y múltiples productos al considerar las incertidumbres de los proveedores de materias primas y la demanda de los clientes. Khatami *et al.* [26] desarrollaron una formulación de dos etapas para abordar una red CSCC de varios períodos y múltiples productos bajo incertidumbre en las demandas de los productos y la cantidad de productos retornados. Giri y Sharma [27] consideraron la incertidumbre en una red CSCC como porcentaje de productos usados que contienen partes útiles, así como la probabilidad de que uno de sus dos nuevos proveedores de componentes no entreguen productos. Keyvanshokoh *et al.* [28] desarrollaron un modelo de programación estocástica híbrida que considera escenarios estocásticos con respecto a los costos de transporte, las demandas y las devoluciones de productos.

Hosoda y Disney [29] desarrollaron políticas de optimización en un CSCC con tasas variables de la demanda y de los retornos. Zeballos *et al.* [30] propusieron un modelo MILP estocástico de dos etapas para una red CSCC considerando las incertidumbres en la cantidad y calidad de los retornos. Wu *et al.* [31] consideraron la demanda incierta de productos, los costos de operar las instalaciones y las unidades de productos reciclados mientras que Kim *et al.* [32] abordaron las incertidumbres en la demanda y los retornos de una red CSCC en la industria de la moda. Ruiz-Torres *et al.* [17] consideraron múltiples escenarios para las devoluciones y la condición de las devoluciones en un modelo CSCC donde la entrega de nuevos componentes también es incierta. Ponte *et al.* [33] investigaron la dinámica de un sistema híbrido de fabricación / remanufactura considerando la incertidumbre en el volumen de retorno y concluyen que existe una relación significativa entre el rendimiento operativo y esta incertidumbre.

Los estudios de Masoudipour *et al.* [7], Taleizadeh *et al.* [10], Ruiz-Torres *et al.* [17], De Giovanni y Zaccour [20], Aras y Aksent [34], Aras *et al.* [35], He [36], De Giovanni *et al.* [37], Bhattacharya *et al.* [38], y Modak *et al.* [39] han examinado cómo los incentivos impactan la cantidad y la calidad de los artículos retornados. Aras y Aksent [34] y Aras *et al.* [35] propusieron modelos mixtos de ubicación-asignación de instalaciones para establecer los valores y ubicaciones óptimos de los incentivos. He [36] investigó una red CSCC donde la recuperación del componente es estocástica y depende de los incentivos ofrecidos para maximizar las ganancias totales. De Giovanni *et al.* [37] investigaron una red CSCC que consta de un fabricante y un minorista, donde ambos participan en un programa de recuperación de productos, ofreciendo incentivos a los consumidores para devolver los productos usados. Masoudipour *et al.* [7] estudiaron las tasas de incentivos basadas en políticas de segmentación calculadas a partir de la calidad del artículo devuelto. Bhattacharya *et al.* [38] consideraron una red CSCC donde los artículos devueltos tenían diferentes niveles de calidad y las tasas de devolución se basaban en el incentivo ofrecido a los retornantes en cada etapa. Modak *et al.* [39] examinaron las estrategias de recolección en una red CSCC donde la tasa de retorno de los productos dependía de la inversión del minorista en las actividades de recolección. Taleizadeh *et al.* [10] consideraron una política de incentivos en la que los clientes recibían un descuento para comprar nuevos productos al devolver productos usados y el descuento ofrecido dependía de la calidad del producto devuelto. Ruiz-Torres *et al.* [17] propusieron un modelo que ayuda a administrar el flujo de devoluciones al determinar los incentivos para ofrecer a los retornantes, al tiempo que determina un contrato de capacidad con el proveedor de nuevos componentes.

**2.2. Selección y asignación de órdenes a los proveedores.-** El problema de selección de proveedores y la asignación de órdenes entre los proveedores seleccionados es uno de alta complejidad [40-42]. Para garantizar el suministro de materiales a lo largo de la cadena de suministro, el proceso de selección involucra varios factores y criterios conflictivos como el precio

y la calidad de los materiales suministrados y la confiabilidad de las entregas. Muchos estudios han examinado este problema sin considerar los riesgos de falla de los proveedores [40]. Sin embargo, los flujos de material pueden verse afectados por desastres naturales inesperados o provocados por el hombre, como terremotos, incendios, inundaciones, huracanes, averías de equipos, huelgas laborales, crisis económica, quiebras, sabotaje o ataques terroristas [42].

Múltiples investigaciones han considerado modelos donde existe la posibilidad de falla en la entrega de los proveedores. Berger *et al.* [43] fue el primer estudio que consideró la probabilidad de falla del proveedor en el problema de selección de proveedores y consideró los riesgos asociados con una red de proveedores, que incluyó eventos catastróficos que afectan a todos los proveedores, así como eventos únicos que afectaron solo a un solo proveedor. A su vez, Ruiz-Torres y Mahmoodi [44] desarrollaron una extensión de este trabajo al proponer un modelo de decisión para optimizar la asignación de la demanda en un conjunto de proveedores al considerar tres factores de costo clave: las pérdidas esperadas debido a la falta de entrega del proveedor, los costos de compra y el costo de mantener un conjunto de proveedores. Moritz y Pibernik [45] expandieron en el modelo de Ruiz-Torres y Mahmoodi [44] asumiendo descuentos en los costos de los proveedores basándose en el volumen de la orden asignada a cada proveedor.

Por su parte, Sarkar y Mohapatra [46] y Meena *et al.* [47] abordaron el problema de determinar el número de proveedores bajo riesgos de falla del proveedor debido a eventos extremos y eventos únicos. Sawik [48] investigó la cartera de suministros óptima en un entorno de fabricación por pedido basado en el precio y la calidad de las piezas compradas, así como la confiabilidad de la entrega. Meena y Sarmah [49] desarrollaron un modelo de programación no lineal para la asignación de pedidos entre múltiples proveedores bajo riesgos de interrupción del suministro para minimizar el costo total considerando diferentes capacidades, probabilidades de fallas y descuentos por cantidad para cada proveedor. Sawik [42] propuso un modelo para la selección de una cartera de suministro resistente en una cadena de suministro con riesgos de interrupción. Ruiz-Torres *et al.* [50] analizaron un modelo en el que los artículos obtenidos se utilizan en múltiples instalaciones, se pueden comprar a múltiples proveedores con diferentes características de costo y confiabilidad, y los proveedores tenían flexibilidad de producción que les permitía entregar una cantidad de contingencia en caso de que otros proveedores fallaran.

Más adelante, Torabi *et al.* [51] desarrollaron un modelo de programación estocástica de dos etapas y dos objetivos para construir bases de suministro resistentes considerando las incertidumbres de las interrupciones importantes, así como los riesgos operativos. Kamalahmadi y Mellat-Parast [52] utilizaron un modelo para desarrollar estrategias de contingencia en caso de ocurrir eventos disruptivos, el modelo integra la selección de proveedores y localización de la demanda con selección de cadenas de transportación y desarrollo de planes de contingencia para mitigar y minimizar los costos de la red. Meena y Sarmah [53] desarrollaron un modelo analítico y un procedimiento de solución para determinar el número óptimo de proveedores y la asignación óptima de la demanda entre los proveedores seleccionados bajo los riesgos de falla del proveedor y consideraron diferentes probabilidades de falla, capacidad y descuento de precio basado en la cantidad para cada proveedor.

Más recientemente, Sawik [54] propone un modelo que selecciona un proveedor y determina cuándo entregar las piezas específicas del producto requeridas para cada pedido del cliente para cumplir con la fecha de vencimiento solicitada por el cliente. Esmaeili-Najafabadi *et al.* [55] desarrollaron un modelo de programación no lineal y consideran las políticas de protección e inventario de emergencia para optimizar la selección de proveedores y la asignación de pedidos con el fin de reducir los efectos de interrupción. Lücker *et al.* [56] determinaron los niveles óptimos de inventario y las tasas de producción de capacidad de reserva para una empresa que está expuesta

al riesgo de interrupción de la cadena de suministro; caracterizando cuatro estrategias principales de mitigación de riesgos: estrategia de inventario, estrategia de capacidad de reserva, estrategia mixta y aceptación pasiva. Finalmente, Hosseini *et al.* [57] calcularon la probabilidad de un escenario de interrupción de los proveedores utilizando un modelo gráfico probabilístico, y luego propusieron un modelo estocástico para apoyar la toma de decisiones en términos de cómo y cuándo usar estrategias proactivas y reactivas en selección de proveedores y asignación de pedidos.

**2.3. Contribución a la literatura.-** Este estudio combina elementos de las áreas de conocimiento descritas en las subsecciones anteriores. En particular el modelo que se propone considera una red CSCC donde se ofrecen incentivos como en Bhattacharya *et al.* [38], y estos incentivos directamente afectan la cantidad de los retornos. Como en Aras y Aksen [34] y Aras *et al.* [35] elementos de la decisión son los integrantes de la red, en este caso qué fuentes de retorno serán utilizadas. El modelo propuesto también considera decisiones asociadas con la cantidad a reservar de un proveedor de componentes nuevos cuando existen riesgos de no cumplir con la entrega como en Meena *et al.* [47] y Sawik [54].

El modelo propuesto en Ruiz-Torres *et al.* [17] es el único en la literatura que considera de manera integrada estas áreas; las decisiones asociadas con los incentivos que ofrecer a las fuentes de retorno y decisiones asociadas con el proveedor de nuevos componentes. El modelo propuesto en este estudio expande el trabajo de Ruiz-Torres *et al.* [17] al incluir decisiones asociadas con qué fuentes de retorno deben de ser utilizadas y al tener descuentos por la cantidad de capacidad reservada. Este trabajo de investigación es una contribución significativa a la literatura al proveer un modelo integrado de incentivos, diseño de red de retornos, y selección de capacidad de componentes nuevos.

**3. Modelo propuesto.-** En esta sección se describe el modelo propuesto y se presenta un ejemplo para demostrar su funcionamiento. Este modelo considera la situación donde una empresa de manufactura requiere  $d$  unidades de un componente cada ciclo de producción para satisfacer las necesidades de sus clientes. Este componente se puede obtener como un artículo nuevo o usado que va a ser remanufacturado internamente. Los componentes usados se reciben en una condición similar de desgaste y deterioro. Existen varias fuentes de retorno para el componente usado y cada fuente está relacionada con la ubicación donde se recogen los componentes. Los componentes usados se remanufacturan a una condición "nueva". Se utiliza un solo proveedor de componentes nuevos.

**3.1. Fuentes de retorno.-** El conjunto de fuentes de retorno es representado por  $F$  y una decisión del modelo es cuales fuentes de retorno serán utilizadas. El conjunto de niveles de incentivos es representado por  $I$ . La cantidad de unidades retornadas por cada fuente es incierta y está relacionada con el incentivo que se ofrece. El conjunto de los niveles de cantidad de retorno es representado por  $Z$ . La variable  $q_{z,i,f}$  es la cantidad de unidades retornadas en el nivel de retorno  $z$  cuando el nivel de incentivo  $i$  se le ofrece a la fuente  $f$ .

El problema se modela como un árbol de decisión basándose en los niveles de retorno. El árbol incluye todas las fuentes de retorno ya que en el caso de que una o más fuentes no sean utilizadas, los incentivos y cantidades asociadas se convierten en 0. Cada combinación de los niveles de retorno es un posible escenario (estado de la naturaleza). Se define la variable  $E$  como el conjunto de todos los posibles escenarios.

El modelo considera dos decisiones que la empresa va a tomar en relación con las fuentes de retorno: cuáles fuentes de retorno utilizar/operar y el incentivo que va a ofrecer en cada fuente. La

variable  $u_f$  representa una decisión binaria igual a 1 si la fuente de retorno  $f$  será utilizada y es igual a 0 en caso contrario. La variable  $a_{i,f}$  representa una decisión binaria igual a 1 si se ofrece el nivel de incentivo  $i$  a la fuente de retorno  $f$  y es igual a 0 en caso contrario. Las variables  $u_f$  y  $a_{i,f}$  son elementos de decisión de este modelo y solo se puede seleccionar un nivel de incentivo por fuente de retorno que esté operando, por lo tanto, es necesaria la siguiente restricción  $\sum_{i \in I} a_{i,f} = u_f \forall f \in F$ . La variable  $r_e$  representa la cantidad total de retornos para el escenario  $e$ . La determinación de  $r_e$  se basa en las variables de decisión mencionadas:  $r_e = \sum_{f \in F, i \in I} a_{i,f} \times q_{ze,i,f}$ .

Para demostrar la implementación del modelo se asume una empresa con una demanda por ciclo de 500 unidades ( $d = 500$ ), con 3 posibles fuentes de retorno ( $F = \{f1, f2, f3\}$ ), que existen tres niveles de incentivos ( $I = \{Alto, Medio, Bajo\}$ ) y que existen dos niveles de retorno ( $Z = \{Mucho, Poco\}$ ). El número de escenarios es  $|F|^{|I|}$  y la Figura I presenta todos los posibles escenarios basándose en los tres niveles de incentivos, por lo tanto,  $E = \{(Mucho, Mucho, Mucho), (Mucho, Mucho, Poco), \dots, (Poco, Poco, Poco)\}$ . Se define  $z^e$  como los componentes de nivel de retorno para un escenario, por lo que  $z^1 = (Mucho, Mucho, Mucho)$ ,  $z^2 = (Mucho, Mucho, Poco)$ ,  $z^3 = (Mucho, Poco, Mucho)$ , ... La Tabla I provee la información de las cantidades por fuente, por incentivo, y por nivel de retorno. Los valores utilizados se desarrollaron tomando como base datos de una empresa que remanufactura copadoras.

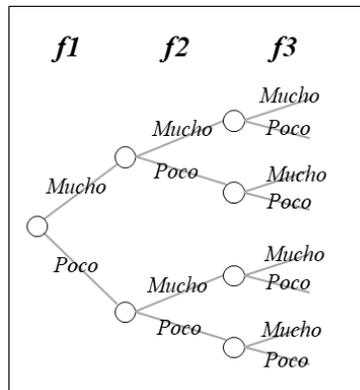


Figura I.- Árbol de decisión con escenarios posibles.

Fuente (f)	Nivel de retorno (z)	Incentivo (i)		
		Alto	Medio	Bajo
f1	Mucho	95	80	70
	Poco	72	62	50
f2	Mucho	189	166	153
	Poco	126	112	90
f3	Mucho	195	165	150
	Poco	125	115	100

Tabla I.- Devolución prevista por fuente, nivel de retorno, y nivel de incentivo ( $q_{z,i,f}$ ).

De manera de demostrar el modelo, se asume que la decisión de la empresa es de usar las tres

fuentes de retorno ( $u_{f1} = u_{f2} = u_{f3} = 1$ ) y ofrecer un incentivo *Alto* para  $f1$ , un incentivo *Bajo* para  $f2$  y un incentivo *Medio* para  $f3$  ( $a_{Alto,f1} = 1, a_{Bajo,f2} = 1, a_{Medio,f3} = 1$ , todos los otros  $a_{i,f} = 0$ ). En la Tabla II se presenta la cantidad de unidades por fuente y el  $r_e$  para cada escenario en  $E$ . El máximo de unidades retornado bajo ese conjunto de decisiones es 413, mientras que el mínimo es 277.

$e$	$z_e$	Retornos por fuente			$r_e$
		$f1$	$f2$	$f3$	
e1	Mucho, Mucho, Mucho	95	153	165	413
e2	Mucho, Mucho, Poco	95	153	115	363
e3	Mucho, Poco, Mucho	95	90	165	350
e4	Mucho, Poco, Poco	95	90	115	300
e5	Poco, Mucho, Mucho	72	153	165	390
e6	Poco, Mucho, Poco	72	153	115	340
e7	Poco, Poco, Mucho	72	90	165	327
e8	Poco, Poco, Poco	72	90	115	277

Tabla II.- Cantidades de devolución prevista por nivel de retorno, nivel de incentivo y fuente para el caso 1 de ejemplo ( $q_{z,i,f}$ ).

**3.2. Proveedor de unidades nuevas.-** El modelo considera una decisión asociada con el proveedor de unidades nuevas: la capacidad reservada. El proveedor ofrece descuentos relacionados a la capacidad reservada, mientras mayor la capacidad, mayor el descuento. La variable  $n$  representa la capacidad reservada, la variable  $T$  representa el conjunto de posibles cantidades que pueden ser reservadas incluyendo 0, y la variable  $n_t$  define la capacidad reservada en el nivel  $t$ . La variable  $h_t$  representa una decisión binaria igual a 1 si se selecciona el nivel  $t$  como la capacidad reservada y es igual a 0 en caso contrario. Solo una cantidad puede ser reservada por lo cual es necesaria la siguiente restricción:  $\sum_{t \in T} h_t = 1$  y la variable  $n$  se determina de esta manera  $n = \sum_{t \in T} n_t \times h_t$ .

La capacidad reservada no se utiliza bajo cada posible escenario ya que es una función del total de unidades retornadas  $r_e$ . La variable  $k_e$  representa el número de componentes nuevos que son ordenados a proveedor en el escenario  $e$ . La cantidad  $k_e$  se define por  $\min[d - r_e, n]$ ; las unidades requeridas del proveedor deben de ser menor o igual que la demanda no satisfecha por los retornos, o la capacidad fija reservada. Se asume que la demanda es siempre mayor que los retornos.

El modelo considera la incertidumbre asociada con la falla de entrega del proveedor. La variable  $w$  representa la probabilidad de que no se reciban las unidades requeridas del proveedor (causas internas o externas). Cuando el proveedor falla, la demanda no satisfecha se define por  $d - r_e$  (la demanda menos el total de los retornos), mientras que la variable  $m_e$  representa la demanda no satisfecha cuando el proveedor entrega;  $m_e = d - r_e - k_e$  (la demanda menos el total de los retornos menos el total de componentes nuevos recibidos del proveedor).

Para el ejemplo se asume que el proveedor permite reservar capacidad en “lotes” de 100 unidades:  $T = \{t1 = 0, t2 = 100, t3 = 200, \dots, t6 = 500\}$ . Se asume un nivel máximo de  $t6 = d = 500$  ya que nunca haría falta ordenar más que la demanda. Se asume como ejemplo que la empresa se decide por  $n = 200$  ( $h_{t3} = 1$ , todos los otros  $h_t = 0$ ). La Tabla III presenta por escenario el

total de unidades retornadas ( $r_e$ ), la demanda no satisfecha cuando el proveedor no entrega ( $d - r_e$ ), la cantidad requerida y entregada por al proveedor ( $k_e$ ), y la demanda no satisfecha cuando no se reciben las unidades requeridas del proveedor ( $m_e$ ). En 7 de los escenarios cuando el proveedor entrega se cumple totalmente con la demanda; en el escenario e8 hay una demanda no satisfecha aun cuando se reciben las unidades requeridas al proveedor.

$e$	$z_e$	$r_e$	$d - r_e$	$k_e$	$m_e$
e1	Mucho, Mucho, Mucho	413	87	87	0
e2	Mucho, Mucho, Poco	363	137	137	0
e3	Mucho, Poco, Mucho	350	150	150	0
e4	Mucho, Poco, Poco	300	200	200	0
e5	Poco, Mucho, Mucho	390	110	110	0
e6	Poco, Mucho, Poco	340	160	160	0
e7	Poco, Poco, Mucho	327	173	173	0
e8	Poco, Poco, Poco	277	223	200	23

Tabla III.- Total por escenario de las unidades retornadas ( $r_e$ ), demanda no satisfecha cuando no se reciben las unidades requeridas al proveedor ( $d - r_e$ ), cantidad requerida y entregada por el proveedor ( $k_e$ ), y demanda no satisfecha cuando se reciben las unidades requeridas al proveedor ( $m_e$ ).

**3.3. Elementos de Costo.-** El modelo considera tres costos asociados con las fuentes de retorno: a) costo fijo asociado con operar cada fuente de retorno; b) costo por unidad asociado con transportar y remanufacturar las unidades provenientes de cada fuente y c) costo de los incentivos que se pagan por unidad retornada. En relación con el proveedor se consideran dos costos: a) costo de reservar capacidad y b) costo por unidad requerida y entregada por el proveedor. Finalmente, el modelo considera el costo asociado con la pérdida de órdenes y clientes futuros basándose en la demanda no satisfecha. Se definen los siguientes parámetros de costo:

- $c_f^{oper}$  Costo fijo para la operación de la fuente de retorno  $f$ .
- $c_f^{tr-rem}$  Costo de transportación/remanufactura por unidad proveniente de la fuente de retorno  $f$ .
- $c_{i,f}^{ince}$  Costo de incentivo por unidad en el nivel  $i$  para la fuente de retorno  $f$ .
- $c_t^{rese}$  Costo por unidad de capacidad reservada para el nivel  $t$ .
- $c^{entr}$  Costo por unidad requerida y entregada por el proveedor.
- $c^{perd}$  Costo por unidad de la demanda no satisfecha.

Los costos tomando las decisiones de la empresa se dividen en costos fijos y costos por escenario (variables). Hay dos costos fijos: costo de operar los centros de retorno y el costo de reservar capacidad.

- $ct^{oper}$  Costo total de operación de las fuentes de retorno.
- $ct^{rese}$  Costo total de reservar capacidad.

Donde:

$$ct^{oper} = \sum_{f \in F} u_f \times c_f^{oper} + \sum_{t \in T} h_t \times c_t^{rese}$$

$$ct^{rese} = \sum_{t \in T} h_t \times n \times c_t^{rese}$$

Hay cuatro componentes de los costos por escenario (variables): costo de transportar/

remanufacturar, costos de incentivos, costo de las unidades recibidas del proveedor cuando entrega, y costos de pérdida por la demanda no satisfecha. Las ecuaciones de los costos por escenario  $e$  son:

$ct_e^{tr-rem}$	Costo total de transportar/ remanufacturar.
$ct_e^{ince}$	Costo total de los incentivos.
$ct^{entr}$	Costo total por la unidades requeridas y entregadas por el proveedor.
$ct^{perd}$	Costo total por demanda no satisfecha.

Donde:

$$\begin{aligned}
 ct_e^{tr-rem} &= \sum_{i \in I, f \in F} a_{i,f} \times q_{ze,i,f} \times c_f^{tr-rem} \\
 ct_e^{ince} &= \sum_{i \in I, f \in F} a_{i,f} \times q_{ze,i,f} \times c_{i,f}^{ince} \\
 ct^{entr} &= (1 - w) \times k_e \times c^{entr} \\
 ct^{perd} &= ((1 - w) \times m_e + w \times (d - r_e)) \times c^{perd}.
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, el costo variable para el escenario  $e$  es  $ct_e^{tr-rem} + ct_e^{ince} + ct^{entr} + ct^{perd}$ . El total de costos variables es basado en el valor esperado sobre todos los posibles escenarios. Cada escenario del modelo tiene una probabilidad en función de las decisiones de incentivo de la empresa. La variable  $p_{z,i,f}$  representa la probabilidad del nivel de retorno  $z$  al ofrecer el nivel de incentivo  $i$  a la fuente  $f$ . Es importante notar que la suma de las probabilidades de los niveles de retorno asociadas con cada fuente y nivel de incentivo suman igual a 1:  $\sum_{z \in Z} p_{z,i,f} = 1 \forall i \in I, \forall f \in F$ . La variable  $p_e$  representa la probabilidad del escenario  $e$ , donde  $p_e = \prod_{f \in F} ((1 - u_f)/|Z| + \sum_{i \in I} (a_{i,f} \times p_{ze,i,f}))$ . El componente  $(1 - u_f)/|Z|$  se utiliza para modelar la probabilidad de fuentes que no están en operación y de donde no se recibirán unidades sin importar el escenario.

La variable  $\Theta$  representa el costo total del sistema;  $\Theta = ct^{oper} + ct^{rese} + \sum_{e \in E} ((ct_e^{tr-rem} + ct_e^{ince} + ct^{entr} + ct^{perd}) \times p_e)$ . El objetivo del modelo es minimizar  $\Theta$ .

Para el ejemplo se asume que la probabilidad de que no se reciban las unidades del proveedor es 5% ( $w = 5\%$ ), el costo por unidad de la demanda no satisfecha es \$90 ( $c^{perd} = \$90$ ) y los costos por fuente de retorno están presentados en la Tabla IV. El costo de reservar capacidad en el nivel  $t2$  es \$32 ( $c_{t2}^{rese} = \$32$ ) y disminuye \$1 por nivel, por lo tanto, en  $t6$  es \$28 ( $c_{t6}^{rese} = \$28$ ). El nivel  $t1$  es equivalente a una reservación de capacidad de 0, por lo que  $c_{t1}^{rese}$  es 0. El costo por unidad requerida y entregada es \$8 ( $c^{entr} = \$8$ ).

Fuente ( $f$ )	$c_f^{oper}$	$c_f^{tr-rem}$	$c_{Alto,f}^{ince}$	$c_{Medio,f}^{ince}$	$c_{Bajo,f}^{ince}$
$f1$	\$1,860	\$4	\$10.0	\$5.0	\$1.5
$f2$	\$2,260	\$5	\$6.0	\$3.0	\$0.75
$f3$	\$2,790	\$7	\$9.0	\$4.5	\$1.25

Tabla IV.- Parámetros de costo relacionados a las fuentes de retorno.

Basado en las decisiones de la empresa de operar todos los centros de retorno ( $u_{f1} = u_{f2} = u_{f3} = 1$ ) y de reservar capacidad al nivel  $t3$  ( $h_{t3} = 1$ , todos los otros  $h_t = 0$ ), los costos fijos son los siguientes:  $ct^{oper} = \$1,860 + \$2,260 + \$2,790 = \$6,910$  y  $ct^{rese} = 200 \times \$31 = \$6,200$ . La Tabla V presenta los cuatro costos variables y su suma por escenario.

Por ejemplo, en  $e_8$  se reciben 72, 90, y 115 de  $f_1$ ,  $f_2$ , y  $f_3$  respectivamente ( $q_{Poco,Alto,f_1} = 72, q_{Poco,Bajo,f_2} = 90, q_{Poco,Medio,f_3} = 115$ ). Por lo tanto,  $ct_{e_8}^{tr-rem} = 72 \times \$4 + 90 \times \$5 + 115 \times \$7 = \$1,543$  y  $ct_{e_8}^{inca} = 72 \times \$10 + 90 \times \$0.75 + 115 \times \$4.5 = \$1,305$ . En  $e_8$  se requieren 200 unidades del proveedor ( $k_{e_8} = 200$ ), por lo tanto,  $ct_{e_8}^{entr} = 95\% \times 200 \times \$8 = \$1,520$ . En  $e_8$  cuando se reciben las unidades del proveedor, la demanda no satisfecha es 23 unidades ( $m_{e_8} = 23$ ) y cuando no se reciben la demanda no satisfecha es 223 unidades ( $d - r_{e_8} = 223$ ), por lo tanto  $ct_{e_8}^{perd} = (95\% \times 23 + 5\% \times 223) \times \$90 = \$2,970$ .

$e$	$z_e$	$ct_e^{tr-rem}$	$ct_e^{inca}$	$ct_{e_8}^{entr}$	$ct_{e_8}^{perd}$	Suma
$e_1$	Mucho, Mucho, Mucho	\$ 2,300	\$ 1,807	\$661	\$ 392	\$ 5,160
$e_2$	Mucho, Mucho, Poco	\$ 1,950	\$ 1,582	\$1,041	\$ 617	\$ 5,190
$e_3$	Mucho, Poco, Mucho	\$ 1,985	\$ 1,760	\$1,140	\$ 675	\$ 5,560
$e_4$	Mucho, Poco, Poco	\$ 1,635	\$ 1,535	\$1,520	\$ 900	\$ 5,590
$e_5$	Poco, Mucho, Mucho	\$ 2,208	\$ 1,577	\$836	\$ 495	\$ 5,116
$e_6$	Poco, Mucho, Poco	\$ 1,858	\$ 1,352	\$1,216	\$ 720	\$ 5,146
$e_7$	Poco, Poco, Mucho	\$ 1,893	\$ 1,530	\$1,315	\$ 779	\$ 5,516
$e_8$	Poco, Poco, Poco	\$ 1,543	\$ 1,305	\$1,520	\$ 2,970	\$ 7,338

Tabla V.- Costos variables por escenario para el ejemplo.

La Tabla VI presenta las probabilidades por escenario para el nivel *Poco*, donde  $p_{Mucho,i,f} = 1 - p_{Poco,i,f} \forall i \in I, \forall f \in F$  (recordando que las probabilidades para los niveles de retorno para cada fuente y nivel de incentivo suman igual a 1). Es importante notar que el modelo no condiciona la relación entre las probabilidades de entrega y los niveles de incentivos, pero es lógico asumir que el valor esperado de las unidades retornadas por nivel de incentivo y fuente ( $\sum_{z \in Z} q_{z,i,f} \times p_{z,i,f}$ ) aumentan a medida que los incentivos aumentan. Por ejemplo, en el caso de  $f_2$ , la probabilidad del nivel de retorno Mucho disminuye al aumentar los incentivos ( $p_{Mucho,Bajo,f_2} = 65\%, p_{Mucho,Medio,f_2} = 55\%, p_{Mucho,Alto,f_2} = 45\%$ ), pero el valor esperado de unidades aumenta. El valor esperado de unidades para el nivel de incentivos *Bajo* es 130.9 ( $65\% \times 153 + 35\% \times 90$ ), para el nivel de incentivos *Medio* es 141.7 ( $55\% \times 166 + 45\% \times 112$ ) y para el nivel de incentivo *Alto* es 154.4 ( $45\% \times 189 + 55\% \times 126$ ).

Fuente ( $f$ )	Incentivo ( $i$ )		
	Alto	Medio	Bajo
$f_1$	35%	40%	60%
$f_2$	55%	45%	35%
$f_3$	65%	60%	90%

Tabla VI.- Probabilidad del nivel de retorno Poco por nivel de incentivo y fuente ( $p_{Poco,i,f}$ ).

La Tabla VII presenta las probabilidades que aplican por escenario dadas las decisiones de la empresa ( $a_{Alto,f_1} = 1, a_{Bajo,f_2} = 1, a_{Medio,f_3} = 1, todos\ los\ otros\ a_{i,f} = 0$ ).

Para determinar el costo total se suman los costos fijos al valor esperado de los costos por escenario:  $\Theta = \$6,910 + \$6,200 + (\$5,160 \times 16.9\% + \$5,190 \times 25.4\% + \dots + \$7,338 \times 7.4\%) = \$18,544$ .

$e$	$z_e$	$p_{z,Alto,f1}$	$p_{z,Bajo,f2}$	$p_{z,Medio,f3}$	$p_e$
e1	Mucho, Mucho, Mucho	65%	65%	40%	16.9%
e2	Mucho, Mucho, Poco	65%	65%	60%	25.4%
e3	Mucho, Poco, Mucho	65%	35%	40%	9.1%
e4	Mucho, Poco, Poco	65%	35%	60%	13.7%
e5	Poco, Mucho, Mucho	35%	65%	40%	9.1%
e6	Poco, Mucho, Poco	35%	65%	60%	13.7%
e7	Poco, Poco, Mucho	35%	35%	40%	4.9%
e8	Poco, Poco, Poco	35%	35%	60%	7.4%

Tabla VII.- Probabilidad de cada escenario ( $p_e$ ).

Se presenta ahora un segundo ejemplo (segundo conjunto de decisiones): la empresa decide solo usar las fuentes  $f2$  y  $f3$  ( $u_{f1} = 0, u_{f2} = u_{f3} = 1$ ) y para ambas se les ofrece el nivel de incentivo *Alto*, ( $a_{Alto,f2} = a_{Alto,f3} = 1, todos los otros a_{i,f} = 0$ ). Además, la empresa continuará reservando 200 unidades ( $n = 200$ ). Esto significa que los costos fijos son los siguientes:  $ct^{oper} = \$2,260 + \$2,790 = \$5,050$  y  $ct^{rese} = 200 \times \$31 = \$6,200$ .

La Tabla VIII presenta las cantidades retornadas en este segundo ejemplo donde el máximo número de unidades retornadas es 384 y el mínimo es 251. Es importante notar que dado que  $f1$  no opera en este caso, hay en el sentido “práctico” solo 4 escenarios. El escenario  $e1$  y el  $e5$  son iguales, el  $e2$  y el  $e6$  son iguales y así sucesivamente.

$e$	$z_e$	Retornos por fuente			$r_e$
		$f1$	$f2$	$f3$	
e1	Mucho, Mucho, Mucho	0	189	195	384
e2	Mucho, Mucho, Poco	0	189	125	314
e3	Mucho, Poco, Mucho	0	126	195	321
e4	Mucho, Poco, Poco	0	126	125	251
e5	Poco, Mucho, Mucho	0	189	195	384
e6	Poco, Mucho, Poco	0	189	125	314
e7	Poco, Poco, Mucho	0	126	195	321
e8	Poco, Poco, Poco	0	126	125	251

Tabla VIII.- Cantidades de devolución previstas por nivel de retorno, nivel de incentivo y fuente para el segundo ejemplo ( $q_{z,i,f}$ ).

La Tabla IX presenta por escenario el total de unidades retornadas ( $r_e$ ), la demanda no satisfecha cuando no se reciben las unidades requeridas del proveedor ( $d - r_e$ ), la cantidad requerida y entregada por al proveedor ( $k_e$ ), y la demanda no satisfecha cuando se reciben las unidades requeridas del proveedor ( $m_e$ ). En los escenarios  $e4$  y  $e8$  cuando se reciben las unidades requeridas del proveedor no se cumple totalmente con la demanda. La Tabla X presenta los cuatro costos variables y su suma por escenario. Al comparar los valores con los de la Tabla V (primer conjunto de decisiones de la empresa), estos costos son mayores para cada escenario.

$e$	$z_e$	$r_e$	$d - r_e$	$k_e$	$m_e$
e1	Mucho, Mucho, Mucho	384	116	116	0
e2	Mucho, Mucho, Poco	314	186	186	0
e3	Mucho, Poco, Mucho	321	179	179	0
e4	Mucho, Poco, Poco	251	249	200	49
e5	Poco, Mucho, Mucho	384	116	116	0
e6	Poco, Mucho, Poco	314	186	186	0
e7	Poco, Poco, Mucho	321	179	179	0
e8	Poco, Poco, Poco	251	249	200	49

Tabla IX.- Total de unidades retornadas ( $r_e$ ), demanda no satisfecha cuando el proveedor no entrega ( $d - r_e$ ), cantidad requerida y entregada por al proveedor ( $k_e$ ), y demanda no satisfecha cuando el proveedor entrega ( $m_e$ ) para el segundo ejemplo.

$e$	$z_e$	$ct_e^{tr-rem}$	$ct_e^{inca}$	$ct^{entr}$	$ct^{perd}$	Suma
e1	Mucho, Mucho, Mucho	\$ 2,310	\$ 2,889	\$882	\$ 522	\$ 6,603
e2	Mucho, Mucho, Poco	\$ 1,820	\$ 2,259	\$1,414	\$ 837	\$ 6,330
e3	Mucho, Poco, Mucho	\$ 1,995	\$ 2,511	\$1,360	\$ 806	\$ 6,672
e4	Mucho, Poco, Poco	\$ 1,505	\$ 1,881	\$1,520	\$ 5,310	\$ 10,216
e5	Poco, Mucho, Mucho	\$ 2,310	\$ 2,889	\$882	\$ 522	\$ 6,603
e6	Poco, Mucho, Poco	\$ 1,820	\$ 2,259	\$1,414	\$ 837	\$ 6,330
e7	Poco, Poco, Mucho	\$ 1,995	\$ 2,511	\$1,360	\$ 806	\$ 6,672
e8	Poco, Poco, Poco	\$ 1,505	\$ 1,881	\$1,520	\$ 5,310	\$ 10,216

Tabla X.- Costos variables por escenario para el segundo ejemplo.

En la Tabla XI se presentan las probabilidades por escenario. Dado a que no hay incentivos en la fuente  $f_1$  al no estar en operación ( $u_{f_1} = 0$ ), se presenta el componente  $(1 - u_f)/|Z|$ . En este segundo ejemplo el costo total es:  $\Theta = \$5,050 + \$6,200 + (\$6,603 \times 7.9\% + \$6,330 \times 14.6\% + \dots + \$10,216 \times 17.9\%) = \$19,078$ . Por lo tanto, este segundo conjunto de decisiones, aunque redujo los costos fijos, incrementa los costos totales.

$e$	$z_e$	$(1 - u_{f_1})/ Z $	$p_{z,Alto,f_2}$	$p_{z,Alto,f_3}$	$p_e$
e1	Mucho, Mucho, Mucho	50%	45%	35%	7.9%
e2	Mucho, Mucho, Poco	50%	45%	65%	14.6%
e3	Mucho, Poco, Mucho	50%	55%	35%	9.6%
e4	Mucho, Poco, Poco	50%	55%	65%	17.9%
e5	Poco, Mucho, Mucho	50%	45%	35%	7.9%
e6	Poco, Mucho, Poco	50%	45%	65%	14.6%
e7	Poco, Poco, Mucho	50%	55%	35%	9.6%
e8	Poco, Poco, Poco	50%	55%	65%	17.9%

Tabla XI.- Probabilidad de cada escenario, segundo ejemplo ( $p_e$ ).

**3.4. Glosario de variables y parámetros.-** El modelo tiene tres variables de decisión, todas de tipo binarias:

$u_f$	La variable es igual a 1 si la fuente de retorno $f$ será utilizada y es igual a 0 en caso contrario.
$h_t$	La variable es igual a 1 si se selecciona el nivel $t$ como la capacidad reservada y es igual a 0 en caso contrario.
$a_{i,f}$	La variable es igual a 1 si se ofrece el nivel de incentivo $i$ a la fuente de retorno $f$ y es igual a 0 en caso contrario.

Parámetros del modelo:

$d$	Unidades requeridas del componente cada ciclo de producción
$F$	Conjunto de fuentes de retorno
$I$	Conjunto de niveles de incentivos.
$Z$	Conjunto de niveles de cantidad de retorno.
$q_{z,i,f}$	Cantidad de unidades retornadas en el nivel de retorno $z$ cuando el nivel de incentivo $i$ se le ofrece a la fuente $f$ .
$r_e$	Cantidad total de retornos para el escenario $e$ .
$n$	Capacidad reservada.
$T$	Conjunto de posibles cantidades que pueden ser reservadas.
$n_t$	Capacidad reservada en el nivel $t$ .

**3.5. Formulación del Modelo.-** La función objetivo es  $MIN(\Theta)$  sujeto a las siguientes restricciones:

$$\Theta = ct^{oper} + ct^{rese} + \sum_{e \in E} ((ct_e^{tr-rem} + ct_e^{inca} + ct^{entr} + ct^{perd}) \times p_e)$$

$$\sum_{i \in I} a_{i,f} = u_f \quad \forall f \in F \quad (1)$$

$$\sum_{f \in F, i \in I} a_{i,f} \times q_{ze,i,f} = r_e \quad \forall e \in E \quad (2)$$

$$\sum_{t \in T} h_t = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{t \in T} n_t \times h_t = n \quad (4)$$

$$k_e \leq n \quad (5)$$

$$k_e + m_e + r_e = d \quad \forall e \in E \quad (6)$$

$$m_e, k_e \geq 0 \quad \forall e \in E \quad (7)$$

$$u_f \in \{0,1\} \quad \forall f \in F \quad (8)$$

$$h_t \in \{0,1\} \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$a_{i,f} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall f \in F \quad (10)$$

La restricción (1) garantiza que solo se utiliza un incentivo por fuente de retorno en operación y la restricción (2) establece el número de retornos por escenario. La restricción (3) garantiza que solo se reserva un nivel de capacidad del proveedor y la restricción (4) establece la cantidad reservada. La restricción (5) establece que lo que será requerido del proveedor será menor o igual a la cantidad reservada. La restricción (6) establece que la suma de las unidades requeridas, la demanda no satisfecha y el total de unidades retornadas son iguales a la demanda. La restricción (7) establece la no negatividad mientras que las restricciones (8), (9) y (10) establecen las variables binarias.

**4. Análisis del modelo.-** En esta sección se realiza un estudio de sensibilidad usando como base el ejemplo numérico descrito en la sección 3. Las cantidades de devolución previstas por fuente, nivel

de retorno, y nivel de incentivo fueron presentadas en la Tabla I, los parámetros de costo relacionados a las fuentes de retorno fueron presentados en la Tabla IV, y las probabilidades por nivel de retorno, nivel de incentivo y fuente fueron presentados en la Tabla VI. La probabilidad de que no se reciban las unidades del proveedor es 5% ( $w = 5\%$ ), el costo por unidad de la demanda no satisfecha es \$90 ( $c^{perd} = \$90$ ), y se reserva en “lotes” de 100 donde el nivel  $t1$  es equivalente a una reservación de capacidad de 0, por lo que  $c_{t1}^{rese}$  es 0 y el costo de reservar capacidad en el nivel  $t2$  es \$32 ( $c_{t2}^{rese} = \$32$ ), disminuyendo \$1 por nivel. Finalmente, el costo por unidad requerida y entregada es \$8 ( $c^{entr} = \$8$ ). La solución óptima utilizando el modelo matemático es el uso de las tres fuentes de retorno ( $u_{f1} = u_{f2} = u_{f3} = 1$ ) y ofrecer un incentivo *Medio* para  $f1$  y  $f2$ , y un incentivo *Bajo* para  $f3$  ( $a_{Medio,f1} = 1, a_{Medio,f2} = 1, a_{Bajo,f3} = 1, todos los otros a_{i,f} = 0$ ). La capacidad reservada fue de  $n = 200$ . Estas decisiones resultaron en  $\Theta = \$18,356$ , lo cual, al ser la solución óptima, es un valor menor a los costos de las dos decisiones presentadas en la sección anterior. Las soluciones óptimas se determinaron utilizando MS Excel 365 con una rutina en VBA en una computadora personal con un RAM de 12GB y un procesador de 2.7GHz.

Las siguientes secciones analizan cómo cambian las decisiones del modelo al variar distintos parámetros del ejemplo.

**4.1. Fuentes de Retorno.-** Se analizan cambios a dos elementos de las fuentes de retorno:

- a) los costos fijos de operación
- b) la probabilidad de los niveles de retorno.

Se modifican los costos fijos de las fuentes de retorno por un factor  $\alpha$ , un incremento en un porcentaje de la base. El costo fijo de operación se determina por  $c_{f1}^{oper} = \$1,860 \times (1 + \alpha)$ ,  $c_{f2}^{oper} = \$2,260 \times (1 + \alpha)$ ,  $c_{f3}^{oper} = \$2,790 \times (1 + \alpha)$ . El nivel  $\alpha = 0$  es el parámetro base y se evalúan los siguientes niveles de  $\alpha$ : 10%, 20%, 30% y 40%.

Se modifica la probabilidad del nivel *Poco* por un factor  $\beta$  para todos los niveles de incentivos y fuentes. La probabilidad  $p_{Poco,i,f}$  se basa entonces en la Tabla XII. El nivel  $\beta = 1$  es el parametro base y se evalúa el efecto de  $\beta = 0.8$  y  $\beta = 0.6$ , lo que implica una reducción en la probabilidad de un nivel de retorno *Poco* de 20% y 40% respectivamente.

Fuente (f)	Incentivo (i)		
	Alto	Medio	Bajo
f1	$35\% \times \beta$	$40\% \times \beta$	$60\% \times \beta$
f2	$55\% \times \beta$	$45\% \times \beta$	$35\% \times \beta$
f3	$65\% \times \beta$	$60\% \times \beta$	$90\% \times \beta$

Tabla XII.- Probabilidad del nivel de retorno *Poco* por nivel de incentivo y fuente ( $p_{Poco,i,f}$ ).

La Tabla XIII presenta las decisiones para las 15 combinaciones de los niveles de prueba de  $\alpha$  y  $\beta$ . Las decisiones indican el número de fuentes de retorno en operación, los niveles de incentivo por fuente (abreviado,  $A = Alto, M = Medio, B = Bajo$ ), y la capacidad reservada del proveedor.

Seis decisiones son óptimas dentro de los niveles de  $\alpha$  y  $\beta$  bajo análisis: 3 ( $M/M/B$ ), 200; 3 ( $A/A/M$ ), 100; 2 ( $M/M/-$ ), 300; 2 ( $-/A/M$ ), 200; 1 ( $-/M/-$ ), 400; 0 ( $-/-/-$ ), 500; donde la

esquina superior izquierda es la solución base: 3 (M/M/B), 200. Como es de esperarse, cuando la probabilidad de retornos bajos disminuye ( $\beta \downarrow$ ), se ofrecen más incentivos y se reserva menos capacidad, mientras que, al aumentar los costos de operación de las fuentes de retorno, se reduce el número de fuentes de retorno en operación. En 9 de los 15 puntos experimentales es óptimo el usar 3 fuentes de retorno, mientras que en 2 de los 15 casos no se utiliza ninguna. Cuando la probabilidad de retornos está al nivel base ( $\beta = 1$ ) y los costos operacionales aumentan por un 20%, la decisión sería solo tener en operación dos fuentes de retorno y si aumentan por un 30%, solo se opera una fuente de retorno. Además, en todos los casos aumenta la capacidad reservada. Finalmente, cuando los costos fijos de operación aumentan por un 40%, no tiene beneficio el operarlos, por lo que todas las unidades serían adquiridas del proveedor.

$\alpha$	$\beta$		
	1	0.8	0.6
0	3 (M/M/B), 200	3 (A/A/M), 100	
10%			
20%	2 (M/M/-), 300		
30%	1 (-/M/-), 400	2 (-/A/M), 200	
40%	0 (-/-/-), 500		2 (-/A/M), 200

Tabla XIII.- Decisiones óptimas en los experimentos relacionados a las fuentes de retorno.

**4.2. Probabilidad de que no se reciban las unidades requeridas del proveedor.-** Se evalúa el efecto de cambios a la probabilidad de que no se reciban las unidades requeridas del proveedor ( $w$ ). El valor base es 5% ( $w = 5\%$ ) y se consideran dos niveles adicionales, una reducción en la probabilidad,  $w = 2.5\%$ , y un aumento en la probabilidad,  $w = 10\%$ .

La Tabla XIV presenta las decisiones para los tres niveles de  $w$  bajo la condición base de retornos bajos ( $\beta = 1$ ), y considerando cambios a los costos fijos de operación de las fuentes de retorno:  $\alpha = 0, 20\%, 40\%$ . Bajo estas condiciones generales hay cinco decisiones óptimas: 3 (M/M/B), 200; 3 (A/A/M), 100; 2 (M/M/-), 300; 2 (-/A/M), 200; y 0 (-/-/-), 500. En 5 de los 9 puntos de experimentación es óptimo operar tres fuentes de retorno, en dos es óptimo operar dos y en cuatro es óptimo no operar ninguna fuente. Cuando la probabilidad de no recibir es menor, o sea el proveedor y su entorno son más confiables, la decisión base no cambia si los costos operacionales se mantienen al nivel base. En caso de que los costos operacionales aumentan, la decisión es de no utilizar ninguna de las fuentes de retorno. En cambio, si la probabilidad de no recibir las unidades aumenta, como es de esperarse, se reduce la capacidad reservada y se aumentan los incentivos para obtener más unidades usadas.

$\alpha$	$w$		
	2.5%	5%	10%
0%	3 (M/M/B), 200		3 (A/A/M), 100
20%	0 (-/-/-), 500	2 (M/M/-), 300	
40%		2 (-/A/M), 200	

Tabla XIV.- Decisiones óptimas en los experimentos relacionados a  $w$  con  $\beta = 1$ .

La Tabla XV presenta las decisiones para los tres niveles de  $w$  bajo la condición donde la probabilidad de retornos bajos se ha reducido por un factor de 0.6 ( $\beta = 0.6$ ). Bajo estas condiciones solo son óptimas 3 decisiones: 3 (A/A/M), 100; 2 (-/A/M), 200; y 0 (-/-/-), 500. En 7 de los 9 puntos de experimentación es óptimo operar 3 fuentes de retorno, en 1 punto es óptimo usar dos fuentes, y en 1 punto es óptimo no operar ninguna fuente. Se puede concluir que en general cuando la probabilidad de retornos bajos es menor, es irrelevante si la probabilidad de recibir las

unidades del proveedor cambia, se utilizan las tres fuentes de retornos. Solo cuando el costo de operar las fuentes de retorno aumenta por un 40% y la probabilidad de recibir las unidades es 2.5% es óptimo no operar ninguna de las fuentes.

$\alpha$	$w$		
	2.5%	5%	10%
0%	3 (A/A/M), 100		
20%			
40%	0 (-/-/-), 500	2 (-/A/M), 200	

Tabla XV.- Decisiones óptimas en los experimentos relacionados a  $w$  con  $\beta = 0.6$ .

**4.3. Costo por unidad de la demanda no satisfecha.-** Se evalúa el costo por unidad de la demanda no satisfecha ( $c^{perd}$ ). El valor base es \$90 ( $c^{perd} = \$90$ ) y se consideran dos niveles adicionales, una reducción en el costo,  $c^{perd} = \$45$ , y un aumento en el costo,  $c^{perd} = \$180$ .

La Tabla XVI presenta las decisiones para los tres niveles de  $c^{perd}$  bajo la condición base de retornos bajos ( $\beta = 1$ ), y considerando cambios a los costos fijos de operación de las fuentes de retorno:  $\alpha = 0, 20\%, 40\%$ . Bajo estas condiciones generales hay siete decisiones óptimas: 3 (M/M/M), 100; 3 (M/M/B), 200; 3 (M/M/M), 200; 2(M/M/-), 300; 1 (-/A/-), 300; 1 (-/A/-), 300 y 0 (-/-/-), 500. En 5 de los 9 puntos de experimentación es óptimo operar tres fuentes de retorno, en uno es óptimo operar dos, en dos puntos es óptimo operar una fuente, y en un punto es óptimo no operar ninguna fuente. El cuadro en gris representa el caso base. En este conjunto de experimentos se observan varios efectos interesantes. Cuando  $\alpha = 0$  y  $c^{perd} = \$45$ , la decisión es 3 (M/M/M), 100; mientras que cuando  $c^{perd} = \$180$ , son las mismas fuentes y los mismos incentivos, pero se reserva al próximo nivel de capacidad (3 (M/M/M), 200). Cuando  $\alpha = 40\%$  y  $c^{perd} = \$45$  se utiliza solo la fuente  $f_2$  y se reserva una capacidad de 300, cuando  $c^{perd} = \$90$  no se opera ninguna fuente, mientras que cuando  $c^{perd} = \$180$ , se usa la fuente  $f_2$  con el incentivo *Bajo*, pero la capacidad reservada aumenta en comparación a  $c^{perd} = \$45$ .

$\alpha$	$c^{perd}$		
	\$45	\$90	\$180
0%	3 (M/M/M), 100	3 (M/M/B), 200	3 (M/M/M), 200
20%		2 (M/M/-), 300	
40%	1 (-/A/-), 300	0 (-/-/-), 500	1 (-/M/-), 400

Tabla XVI.- Decisiones óptimas en los experimentos relacionados a  $c^{perd}$  con  $\beta = 1$ .

La Tabla XVII presenta las decisiones para los tres niveles de  $w$  bajo la condición donde la probabilidad de retornos bajos se ha reducido por un factor de 0.6 ( $\beta = 0.6$ ). Bajo estas condiciones generales hay cinco decisiones óptimas: 3 (M/B/M), 100; 3 (A/A/M), 100; 3 (A/A/A), 100; 2(-/A/M), 200; y 1 (-/A/-), 300. En 7 de los 9 puntos de experimentación es óptimo operar tres fuentes de retorno, en un punto es óptimo operar dos, y en un punto experimental es óptimo operar una fuente. En estos experimentos nunca fue óptimo el no operar ninguna fuente. También se observa que en este conjunto de experimentos mientras  $c^{perd}$  aumenta, aumentan los incentivos hasta el punto donde se da el nivel de incentivo *Alto* a todas las fuentes cuando  $c^{perd} = \$180$ .

$\alpha$	$c^{perd}$		
	\$45	\$90	\$180
0%	3 (M/B/M), 100	3 (A/A/M), 100	3 (A/A/A), 100
20%			
40%	1 (-/A/-), 300	2 (-/A/M), 200	

Tabla XVII.- Decisiones óptimas en los experimentos relacionados a  $ct^{perd}$  con  $\beta = 0.6$ .

Los experimentos realizados demuestran que el número de fuentes de retorno, cuáles en particular se utilizan, y los incentivos que se otorgarán a cada fuente depende de las cuatro variables analizadas y las posibles interacciones entre las variables. Como es de esperarse, mientras mayor sea la probabilidad de altos niveles de retorno, más fuentes estarán en operación y más incentivos se les dará, y por consiguiente menos capacidad se reserva. Si los costos de operar las fuentes aumentan, lo opuesto ocurre, menos fuentes y más capacidad se reserva. En esos casos el nivel de incentivos aumenta. Cuando la probabilidad de recibir las unidades requeridas del proveedor aumenta, se prefiere reservar capacidad, pero dependiendo si los costos de operación son los bases o si son mayores. Finalmente, en relación con los costos asociados con la demanda no satisfecha, mientras mayor sean estos por unidad, más fuentes estarán en operación y más incentivos se ofrecerán. El modelo claramente demuestra la complejidad del problema y como la decisión óptima depende de los parámetros y condiciones propios del sistema.

**5. Conclusiones y trabajos futuros.-** Este trabajo contribuye a los conocimientos sobre CSCC con un modelo que considera múltiples variables importantes en un sistema de remanufactura. Este tipo de modelo es relevante para la comunidad científica y profesional dada la creciente preocupación por el medio ambiente, las progresivas regulaciones ambientales y la renovada importancia de la responsabilidad social corporativa. En adición, más y más empresas se han dado cuenta que el diseño eficaz de redes de recuperación de productos puede resultar en una ventaja competitiva (además del creciente interés por conseguir una manufactura más sustentable).

Dada la alta variabilidad que existe actualmente en las CS en cuanto a la cantidad de los productos retornados, sumado al hecho de que los requisitos de producción generalmente superan las unidades usadas entrantes, obliga a las cadenas de suministro de ciclo cerrado a depender de una mezcla de componentes nuevos y remanufacturados. Las empresas pueden proveer incentivos a los usuarios de productos y así promover el reemplazo de sus unidades usadas por unidades nuevas. El proveer incentivos puede resultar en mayores volúmenes de retornos y retornos en mejores condiciones. Pero esto implica costos adicionales que tienen que ser balanceados con el costo de nuevas unidades. El modelo que presenta esta investigación resulta de principal interés para el mundo empresarial, en cuanto permite conseguir la solución óptima que “balancea” todos los elementos de costos.

Hay múltiples direcciones para investigaciones relacionadas con los sistemas de remanufactura donde se utilizan incentivos y se reserva capacidad. Una de estas consistiría en incluir en el modelo la duración del ciclo de reemplazo, lo cual determinaría los niveles de inventario de los componentes, y los costos de procesar las órdenes y los centros de retorno. Otra área interesante sería incluir un elemento de riesgo asociado con los retornos, donde estos no sean utilizables por razones de calidad o tiempo de recibo. En la práctica, es muy importante desarrollar modelos y tecnologías que apoyen conseguir fuentes de retorno confiables y constantes, con volúmenes que garanticen la sustentabilidad y la rentabilidad del proceso.

## 6. Referencias

- [1] Govindan, K., Soleimani, H., 2017. A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus. *Journal of cleaner production* 142, 371-384. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.126>
- [2] Pishvae, M. S., Jolai, F., Razmi, J., 2009. A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*. 28(4), 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2010.05.001>
- [3] Zeballos, L. J., Méndez, C. A., Barbosa-Povoa, A. P., 2016. Design and planning of closed-loop supply chains: A risk-averse multistage stochastic approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 55(21), 6236-6249. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03647>
- [4] Coenen, J., Van der Heijden, R. E., van Riel, A. C., 2018. Understanding approaches to complexity and uncertainty in closed-loop supply chain management: Past findings and future directions. *Journal of cleaner production* 201, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.216>
- [5] Qin, Z., Ji, X., 2010. Logistics network design for product recovery in fuzzy environment. *Eur. J. of Op. Res.* 202(2), 479-490. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.036>
- [6] Agrawal, S., Singh, R. K., Murtaza, Q., 2015. A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling* 97, 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>
- [7] Masoudipour, E., Amirian, H., Sahraeian, R., 2017. A novel closed-loop supply chain based on the quality of returned products. *Journal of cleaner production*. 151, 344-355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.067>
- [8] Maiti, T., Giri, B. C., 2015. A closed loop supply chain under retail price and product quality dependent demand. *J. of Manuf. Syst.* 37, 624-637. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.09.009>
- [9] Liu, L., Wang, Z., Xu, L., Hong, X., & Govindan, K., 2017. Collection effort and reverse channel choices in a closed-loop supply chain. *Journal of cleaner production* 144, 492-500. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.126>
- [10] Taleizadeh, A. A., Haghghi, F., Niaki, S. T. A., 2019. Modeling and solving a sustainable closed loop supply chain problem with pricing decisions and discounts on returned products. *Journal of cleaner production*. 207, 163-181. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.198>.
- [11] Tanco, M., Jurburg, D., & Escuder, M. (2015). Main difficulties hindering supply chain performance: an exploratory analysis at Uruguayan SMEs. *Supply Chain Management: An International Journal*, 20(1), 11-23.

- [12] Klausner, M., & Hendrickson, C. T. (2000). Reverse-logistics strategy for product take-back. *Interfaces*, 30(3), 156-165.  
<https://doi.org/10.1287/inte.30.3.156.11657>
- [13] Heese, H. S., Cattani, K., Ferrer, G., Gilland, W., Roth, A. V., 2005. Competitive advantage through take-back of used products. *Eur. J. of Op. Res.*, 164(1), 143-157.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.008>
- [14] Matsumoto, M., Umeda, Y., 2011. An analysis of remanufacturing practices in Japan. *Journal of Remanufacturing*. 1(1), 2. 10.1186/2210-4690-1-2
- [15] Atasu, A., Sarvary, M., & Van Wassenhove, L. N. (2008). Remanufacturing as a marketing strategy. *Management science*, 54(10), 1731-1746.  
<https://doi.org/10.1287/mnsc.1080.0893>
- [16] De Brito, M. P., Dekker, R., & Flapper, S. D. P. (2005). Reverse logistics: a review of case studies. In *Distribution Logistics* (pp. 243-281). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [17] Ruiz-Torres, A.J., Mahmoodi, F., Ohmori, S., 2019. Joint determination of supplier capacity and returner incentives in a closed-loop supply chain. *Journal of cleaner production*. 215, 1351-1361.
- [18] Govindan, K., Soleimani, H., Kannan, D., 2015. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European journal of operational research* 240(3), 603-626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- [19] Braz, A.C., De Mello, A.M., de Vasconcelos Gomes, L.A., de Souza Nascimento, P.T., 2018. The bullwhip effect in closed-loop supply chains: A systematic literature review. *Journal of cleaner production* 202, 376-389.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.042>
- [20] De Giovanni, P., & Zaccour, G. (2019). A selective survey of game-theoretic models of closed-loop supply chains. *4OR*, 17(1), 1-44. <https://doi.org/10.1007/s1028>
- [21] El-Sayed, M., Afia, N., El-Kharbotly, A., 2010. A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering* 58(3), 423-431.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.040>
- [22] Zeballos, L. J., Gomes, M. I., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q., 2012. Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains. *Computers & Chemical Engineering*. 47, 237-247.  
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.034>
- [23] Benedito, E., Corominas, A., 2013. Optimal manufacturing policy in a reverse logistic system with dependent stochastic returns and limited capacities. *International Journal of Production Research* 51(1), 189-201.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2012.655863>

- [24] Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P. F., Relvas, S., 2013. Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research* 226(3), 436-451. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.035>
- [25] Zeballos, L. J., Méndez, C. A., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q., 2014. Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand. *Computers & Chemical Engineering*. 66, 151-164. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.02.027>
- [26] Khatami, M., Mahootchi, M., Farahani, R. Z., 2015. Benders' decomposition for concurrent redesign of forward and closed-loop supply chain network with demand and return uncertainties. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 79, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.03.003>
- [27] Giri, B. C., & Sharma, S., 2016. Optimal production policy for a closed-loop hybrid system with uncertain demand and return under supply disruption. *Journal of cleaner production* 112, 2015-2028. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.147>
- [28] Keyvanshokoh, E., Ryan, S. M., Kabir, E., 2016. Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition. *European journal of operational research* 249(1), 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.028>
- [29] Hosoda, T., S. M. Disney., 2018. A unified theory of the dynamics of closed-loop supply chains. *European journal of operational research* 269(1), 313-326. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.020>
- [30] Zeballos, L.J., Méndez, C.A. and Barbosa-Povoa, A.P., 2018. Integrating decisions of product and closed-loop supply chain design under uncertain return flows. *Computers & Chemical Engineering*. 112, 211-238. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.02.011>
- [31] Wu, G.H., Chang, C.K. and Hsu, L.M., 2018. Comparisons of Interactive Fuzzy Programming Approaches for Closed-loop Supply Chain Network Design under Uncertainty. *Computers & Industrial Engineering* 68. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.022>.
- [32] Kim, J., Do Chung, B., Kang, Y., Jeong, B., 2018. Robust optimization model for closed-loop supply chain planning under reverse logistics flow and demand uncertainty. *Journal of cleaner production* 196, 1314-1328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.157>
- [33] Ponte, B., M.M. Naim, A. A. Syntetos. (Forthcoming). The effect of returns volume uncertainty on the dynamic performance of closed-loop supply chains. *Journal of Remanufacturing* (2019). <https://doi.org/10.1007/s13243-019-00070-x>
- [34] Aras, N., Aksen, D., 2008. Locating collection centers for distance-and incentive-dependent returns. *International Journal of Production Economics* 111(2), 316-333. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.01.015>

- [35] Aras, N., Aksen, D., Tanuğur, A. G., 2008. Locating collection centers for incentive-dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles. *European Journal of Operational Research* 191(3), 1223-1240. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.002>
- [36] He, Y., 2015. Acquisition pricing and remanufacturing decisions in a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics* 163, 48-60. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.002>
- [37] De Giovanni, P., Reddy, P. V., Zaccour, G., 2016. Incentive strategies for an optimal recovery program in a closed-loop supply chain. *European Journal of Operational Research* 249(2), 605-617. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.021>
- [38] Bhattacharya, R., Kaur, A., & Amit, R. K., 2018. Price optimization of multi-stage remanufacturing in a closed loop supply chain. *Journal of cleaner production* 186, 943-962. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.222>
- [39] Modak, N. M., Modak, N., Panda, S., Sana, S. S., 2018. Analyzing structure of two-echelon closed-loop supply chain for pricing, quality and recycling management. *Journal of cleaner production*. 171, 512-528. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.033>
- [40] Aissauoi N, Haouari M, Hassini E. 2007, Supplier selection and order lot sizing modeling: A review. *Computers & operations research* 34, 3516–3540.
- [41] Ho, W., Xu, X., Dey, P.K., 2010. Multi-criteria decision-making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European journal of operational research* 202, 16–24.
- [42] Sawik, T., 2013, Selection of resilient supply portfolio under disruption risks. *Omega*. 41, 259-269.
- [43] Berger, P.D., Gerstenfeld, A., Zeng, A.Z., 2004, How many suppliers are best? A decision making approach. *Omega*. 32(1), 9-15.
- [44] Ruiz-Torres, A.J., Mahmoodi, F., 2006, A supplier allocation model considering delivery failure, maintenance and supplier cycle costs. *International Journal of Production Economics*. 103(2), 755-766.
- [45] Moritz, S., & Pibernik, R. (2008). The optimal number of suppliers in the presence of volume discounts and different compensation potentials-an analytical and numerical analysis. *European Business School Research Paper*, (09-03). <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1358037>
- [46] Sarkar A., Mohapatra, P.K.J., 2009, Determining the optimal size of supply base with the consideration of risks of supply disruptions. *International Journal of Production Economics*. 119(1), 122-135.
- [47] Meena, P.L., Sarmah, S.P., Sarkar, A., 2011. Sourcing decisions under risks of catastrophic event disruptions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 47(6), 1058-1074.

- [48] Sawik, T., 2011, Supplier selection in make-to-order environment with risks. *Mathematical and Computer Modelling*. 53(9-10), 1670-1679.
- [49] Meena, P.L., Sarmah, S.P., 2013, Multiple sourcing under supplier failure risk and quantity discount: A genetic algorithm approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 50 (C), 84-97.
- [50] Ruiz-Torres, A.J., Mahmoodi, F., Zeng, A.Z., 2013, Supplier selection model with contingency planning for supplier failures. *Computers & Industrial Engineering*. 66(2), 374-382.
- [51] Torabi, S.A., Baghersad, M., Mansouri, S.A., 2015, Resilient supplier selection and order allocation under operational and disruption risks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 79, 22-48.
- [52] Kamalahmadi, M., & Mellat-Parast, M. (2016). Developing a resilient supply chain through supplier flexibility and reliability assessment. *International Journal of Production Research*, 54(1), 302-321. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1088971>
- [53] Meena, P.L., Sarmah, S.P., 2016, Supplier selection and demand allocation under supply disruption risks *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83, 265-274.
- [54] Sawik, T., 2018, Selection of a dynamic supply portfolio under delay and disruption risks. *International Journal of Production Research*. 56(1-2), 760-782. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2017.1401238>
- [55] Esmaeili-Najafabadi, E., Nezhad, M. S. F., Pourmohammadi, H., Honarvar, M., & Vahdatzad, M. A. (2019). A joint supplier selection and order allocation model with disruption risks in centralized supply chain. *Computers & Industrial Engineering* 127, 734-748. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.017>
- [56] Lücker, F., Seifert, R. W., & Biçer, I. (2019). Roles of inventory and reserve capacity in mitigating supply chain disruption risk. *European Journal of Operational Research* 57(4), 1238-1249. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1504173>
- [57] Hosseini, S., Morshedlou, N., Ivanov, D., Sarder, M.D., Barker, K, Al Khaled, A., 2019. Resilient supplier selection and optimal order allocation under disruption risks. *International Journal of Production Economics*. 213, 124-137.

# Recolección y análisis de datos en el ámbito de la eficiencia energética eléctrica

*Data collection and analysis for electric energy efficiency*

---

Hernán Santiso<sup>1</sup>, Martín Salamero<sup>2</sup>, Cristian Novarino<sup>3</sup>

Recibido: Agosto 2020

Aceptado: Noviembre 2020

---

**Resumen.-** El crecimiento en el uso de nuevas tecnologías en los sistemas de medición de consumo eléctrico ha hecho posible el surgimiento de grandes oportunidades de mejora en la gestión energética.

En este proyecto se ha realizado un estudio de aplicación de estas tecnologías con el objeto de colaborar con la diversificación de este tipo de dispositivos a través de soluciones técnicas económicas que puedan ser incorporadas en las viviendas de manera sencilla. De esta forma las personas podrán conocer sus patrones de consumo y detectar oportunidades de ahorro.

Como resultado del trabajo se presenta un prototipo técnico abierto y de bajo costo, que incluye los componentes necesarios para recolectar datos de consumo residencial y volcarlos a un sistema informático de nube, donde los usuarios pueden acceder a información detallada del consumo de los dispositivos que utiliza a diario.

**Palabras clave:** Eficiencia Energética, control de consumo eléctrico, Medición energía bajo costo.

**Summary.-** *The growth of the use of electricity consumption measurement systems new technologies has made possible the emergence of great opportunities to improve energy management.*

*The project aims to study the application of these technologies, in order to collaborate with the diversification of this type of devices through economic technical solutions that can be easily included in the houses. In this way, people will be able to know their consumption patterns and detect savings opportunities.*

*As a result of this work, an open and low-cost technical prototype is presented, including the necessary components to collect home electrical consumption data and upload it to a cloud computing system in order to allow the users access to daily used devices consumption detailed information.*

**Keywords:** *Efficiency Energy, Electric consumption control, low-cost energy measurement.*

**1. Introducción.-** Hace ya algunos años se ha comenzado a tomar conciencia a nivel mundial acerca del efecto adverso para la ecología que provoca el uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica. Sumado a esto el mundo está atravesando por un proceso

---

<sup>1</sup> Facultad de Ing., Universidad Blas Pascal, hsantiso@hotmail.com, ORCID iD: 0000-0001-5500-8892

<sup>2</sup> Facultad de Ing., Universidad Blas Pascal, martin.salamero@gmail.com, ORCID iD: 0000-0001-9174-5937

<sup>3</sup> Facultad de Ing., Universidad Blas Pascal, novacrez@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-4034-3177

sistemático de encarecimiento del costo de las tarifas de servicio que hace que las iniciativas de ahorro y uso eficiente de la energía sean de mucho interés por su campo de aplicación.

Por otro lado, el crecimiento de las tecnologías relacionadas con el Internet de las Cosas, ha facilitado el desarrollo de plataformas de Big data con capacidad de procesamiento de datos extremadamente alta. Sobre dichas plataformas se puede enviar las mediciones recolectados por multiplicidad de diferentes sensores para realizar correlaciones, y establecer modelos de comportamientos que permitan entender y controlar los procesos físicos.

Estos avances nos ofrecen nuevas oportunidades para mejorar la gestión energética a través del procesamiento de mayor cantidad de datos y obtención de información de valor que permita tomar decisiones con mayor nivel de certeza casi en tiempo real, pudiendo detectar anomalías, definir patrones de consumo, anticipar demandas y realizar correcciones y ajustes de manera más oportuna.

A pesar de ello, aún no se vislumbra que estos adelantos estén accesibles al común de la gente, quedando solamente reservada su aplicación en grandes organizaciones que poseen una capacidad de inversión apropiada para implementar estas soluciones o en proyectos especiales en el ámbito privado asociados a la reducción de costos de operación.

En estos últimos años han aparecido un conjunto de dispositivos hogareños tendientes a cubrir esta problemática, pero el costo de los mismos es un tanto elevado y sumado a eso, los datos colectados sólo pueden ser procesados por el proveedor de servicio, dejando de lado del usuario sólo la posibilidad de acceder a los datos de forma limitada.

Es por todo lo expuesto anteriormente, que el objetivo de este trabajo es el de crear un prototipo técnico de recolección y compilación de métricas de consumo de energía eléctrica, que brinde acceso a toda la información recogida a través del uso de tecnologías abiertas, de bajo costo y escalables para el uso masivo.

Un desarrollo de estas características puede ser de gran valor para la comunidad en general ya que posibilitará a los usuarios llevar una contabilidad sobre sus consumos eléctricos, y poder hacer un uso más eficiente de los de la energía reduciendo además los costos del servicio.

**2. Desarrollo del trabajo.-** El proyecto fue dividido en dos etapas principales. En la primera se realizó una investigación del estado actual de situación en cuanto a la gestión de la eficiencia energética, los modelos de arquitectura de las tecnologías de grandes datos y los sistemas de medición y gestión energética para poder determinar los casos de uso reales donde estas soluciones tienen mayor aplicabilidad.

Una vez hecho esto se procedió a crear un prototipo tecnológico abierto y de bajo costo con los componentes necesarios para que la información de consumo energético pueda ser volcada a un sistema de análisis que soporte gran cantidad de información.

Por último, se realizaron pruebas técnicas sobre el del prototipo desarrollado, con el objeto de verificar su utilidad y correcto funcionamiento, con el fin de facilitar la difusión y adopción de estas soluciones por la comunidad en general.

## **2.1. Relevamiento del estado de situación.-**

**2.1.1. La Eficiencia Energética y su relación con el análisis de datos.-** Según el informe

“Indicadores de políticas públicas en materia de eficiencia energética en América latina y el Caribe” [1] establece dos definiciones básicas de eficiencia.

La primera se basa en un concepto bastante utilizado en la ingeniería de energía y es recíproco al consumo específico, expresando una productividad o una relación beneficio/costo. Así, una alta eficiencia energética representa la capacidad de obtener una producción de bienes o servicios con bajo consumo energético.

Otra forma de definir “Eficiencia Energética” se asocia a la eficiencia económica, refiriéndose a una reducción en la energía utilizada para un mismo nivel de satisfacción de un requerimiento energético final, incluyendo los cambios tecnológicos, económicos, institucionales y de comportamiento asociados.

Una manera general de definir la eficiencia energética de un equipo o sistema energético es como el cociente entre flujos energéticos útiles y deseables producidos y los flujos consumidos.

$$Eficiencia\ energética = \left( \frac{Efecto\ energético\ útil\ deseado}{Consumo\ energético} \right) \times Equipo\ o\ proceso$$

Hay sistemas que producen flujos energéticos útiles que no son utilizados, entonces una definición equivalente podría relacionar los flujos energéticos aprovechados y consumidos.

$$Eficiencia\ energética = \left( \frac{Energía\ aprovechada}{Energía\ consumida} \right) \times Equipo\ o\ proceso$$

Este es un aspecto interesante en el estudio de la Eficiencia Energética, pues permite esclarecer por qué la relación entre el uso racional de energía y la mitigación de las pérdidas debe ser una meta permanente. Hay dos grandes grupos de pérdidas energéticas: a) pérdidas irreversibles (o inevitables), b) reversibles (o evitables frente a procesos ideales).

Reducir las pérdidas energéticas a niveles aceptables implica necesariamente actuar en todos estos frentes, considerando naturalmente los limitantes económicos, pudiendo incorporar beneficios ambientales y otras externalidades.

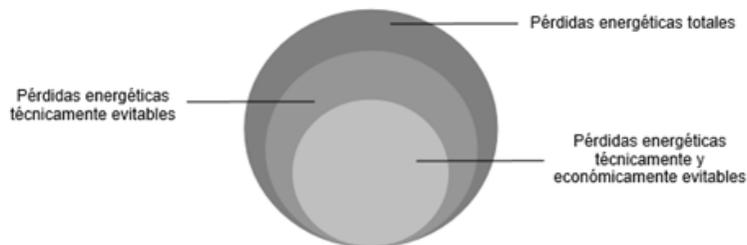


Figura 1.– Pérdidas energéticas totales y evitables.

El consumo de un sistema socioeconómico o de un sector en particular, depende de múltiples factores o variables, lo cual hace difícil establecer las relaciones o ecuaciones que vinculan dicho consumo con las variables explicativas. Podemos decir que el uso de la energía depende en

mayor o menor medida de las siguientes características:

- Ambientales: clima, temperatura, humedad
- Socio-económicas: tamaño de población, condiciones edilicias y uso del espacio, situación económica.
- Energéticas: acceso y abastecimiento o no de determinadas fuentes energéticas, estructura por fuentes del consumo energético, precios de la energía y los artefactos y equipos de utilización de la misma y EE.
- Pautas culturales

Si conocemos con más exactitud estos datos podremos trabajar en las causas para lograr cambios que mejoren la relación de eficiencia. En especial lo que tiene que ver con conductas y cambios en la forma de utilizar la energía como así también controlar mejor desvíos, derroches y uso inapropiado de la energía.

A continuación, se recorren algunos de los diferentes casos de uso aplicables que se han podido encontrar en los distintos trabajos de investigación revisados, poniendo énfasis en los aportes que estas técnicas pueden realizar a la gestión de la eficiencia energética, siempre desde el punto de vista del consumo eléctrico.

**2.1.2. Posibles casos de uso aplicables a eficiencia energética.-** Con el objeto de determinar qué casos de uso relacionados con el análisis de datos pueden colaborar con la eficiencia energética, se procedió a revisar y resumir publicaciones existentes en la materia, ya que existe una vasta experiencia comprobada en este campo. Determinar patrones de consumo y su relación con distintas variables ha sido el foco de numerosos estudios revisados [2-6] entre los que se destacan como principales factores los siguientes:

- Tipo de usuario (residencial o industrial)
- Consumo anormal (asociado a fraude)
- Ocupación edilicia
- Relación consumo potencia real vs aparente
- Día laborable o no laborable
- Hora del día (Amanecer y ocaso)
- Temperatura ambiente, época del año
- Tipos de dispositivos utilizados
- Patrones incrementales.

El análisis de estos y otros aspectos relacionados al consumo son los que conformarán los puntos de partida para la aplicación de la analítica de datos a través de diferentes acciones como por ejemplo la detección temprana de desvíos, conductas anormales o problemas técnicos, la anticipación de la demanda y la retroalimentación para generar conciencia en el uso racional de la energía. Para ello pueden aplicarse distintas técnicas de análisis de datos, ampliamente difundidas como por ejemplo las técnicas de agrupamiento de datos (clustering), métodos autoregresivos, redes neuronales y bosques aleatorios.

Si bien no se encuentra dentro del alcance de este trabajo realizar este tipo de análisis, se debe garantizar que la información obtenida y capturada pueda ser incluida en los mismos para garantizar su correcto procesamiento.

**3. Creación del prototipo.-** Una vez comprendidos los casos de uso de análisis de datos aplicables a la mejora de la eficiencia energética fue necesario encontrar una solución técnica que

permita la recolección y compilación de las métricas de consumo obtenidas, haciendo posible la recolección de dicha información en un repositorio único para su posterior visualización y análisis.

Si bien existen en el mercado múltiples soluciones y dispositivos comerciales que permiten realizar las mediciones de magnitudes eléctricas y recolectarlas para su posterior acceso, no fue posible hallar uno que cumpla con las características necesarias para ser de utilidad en este proyecto y el trabajo a futuro, de acuerdo a las siguientes premisas de diseño:

- Medición de la tensión instantánea
- Medición de la corriente instantánea
- Comunicación mediante Wi-Fi y red celular (GPRS)
- Bajo costo
- Utilización de software y hardware abierto (licencias open source).
- Completamente configurable en lo relativo al envío de datos, intervalos de medición, etc.
- Acceso a los datos en crudo para su posterior análisis.
- Capacidad de almacenar y procesar grandes cantidades de datos (BigData)

El modelo propuesto consta dos partes: en la primera de ellas se presenta la arquitectura necesaria para coleccionar, procesar y analizar los datos medidos en un sistema informático de nube que soporte el procesamiento de grandes datos y en la segunda se detalla el modelo técnico propuesto para implementar un elemento de medición local que pueda tomar métricas de consumo en una instalación objeto de estudio y enviar los valores obtenidos al mencionado sistema.

En el siguiente gráfico (figura II) se puede observar los distintos componentes y sus interacciones.

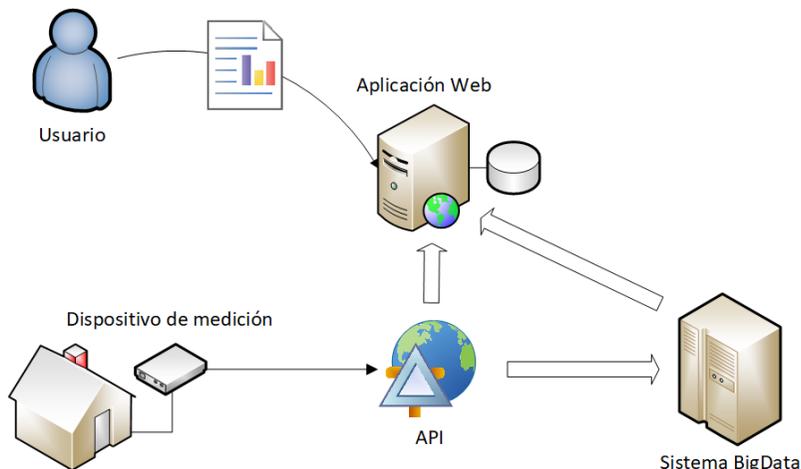


Figura II.– Componentes de un sistema de recolección y análisis de datos de consumo de energía eléctrica.

En esencia la arquitectura del sistema está compuesta por un Programa de Interfaz de Aplicación (API o Application Program Interface), el cual se encarga de recibir los datos del sistema de medición de energía y redireccionar los mismos hacia un sistema de almacenamiento de Big Data.

A su vez se incluye una aplicación web que estará en constante comunicación con su propia base

de datos, y que se encargará de procesar los datos recibidos e informar al usuario el estado de procesamiento como así también servir de interfaz para acceder a la información recolectada.

**3.1. Detalles técnicos de la solución.-** A continuación, se describen en detalle los distintos componentes utilizados para conformar la solución técnica de medición y análisis de datos:

#### Servidor Big Data

Dentro de las opciones se seleccionó InfluxDB [7] en su versión de código abierto ya que es fácil de configurar y es más específico para el tipo de datos a analizar (sistema de software que está optimizado para manejar datos de series de tiempo, matrices de números indexados por tiempo).

#### API y Aplicación WEB

Se utilizó el framework Laravel [8] porque es un marco de desarrollo en lenguaje php que brindan una rápida solución para el desarrollo. Como base de datos de la aplicación se utilizó MariaDB [9] ya que tiene una mejor respuesta en velocidad comparado con MySQL [10].

#### Dispositivo de medición de energía eléctrica

El componente principal del equipo de medición es el sensor, que es un objeto capaz de variar una propiedad ante magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas con un transductor en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser, por ejemplo: intensidad lumínica, temperatura, distancia, aceleración, inclinación, presión, desplazamiento, fuerza, torsión, humedad, movimiento, pH, etc.

El resultado final del diseño incorpora los siguientes elementos principales:

1) PZEM-004T: Es el hardware encargado de la medición de la corriente circulando y la tensión alterna presente en el circuito del ambiente a monitorear. Es una placa con su propio microcontrolador y circuitos asociados, que mediante una bobina toroidal realiza la medición de la corriente consumida, y mediante una resistencia de carga efectúa la medición de voltaje. Toda esta información puede ser recolectada y transmitida por un puerto serie. En la figura III se ilustra el componente PZEM-004T.



Figura III.– Componente PZEM-004T.

2) ESP8266: Es una placa de bajo costo que incorpora comunicación Wi-Fi completa y un microcontrolador programable y librerías disponibles en el entorno de desarrollo Arduino [11] el cual facilita el trabajo con el mismo. En este proyecto se utilizó como unidad central, es decir que se programó para interpretar la información proveniente del sensor PZEM-004T mediante puerto serie, gestionando además las comunicaciones Wi-Fi y GPRS. En la figura IV se ilustra el componente ESP8266.

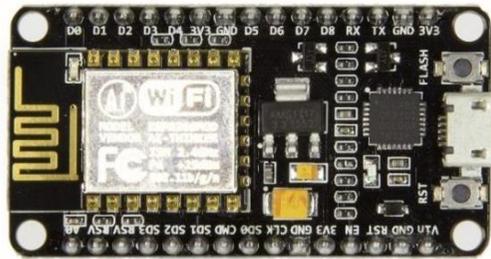


Figura IV.– Componente ESP8266.

3) SIM 900: Es un módulo autónomo de GPRS que se conecta a la red de telefonía móvil de cualquier operador con la sola utilización de un chip GSM, en este proyecto este dispositivo es controlado por el ESP8266 para efectuar el envío de la información de corriente y tensión recabada al servidor encargado de interpretar esos datos. En la figura V se ilustra el componente SIM 900.



Figura V.– Componente SIM 900.

A continuación, en la figura VI se muestra la estructura operativa del sistema de medición de energía eléctrica:

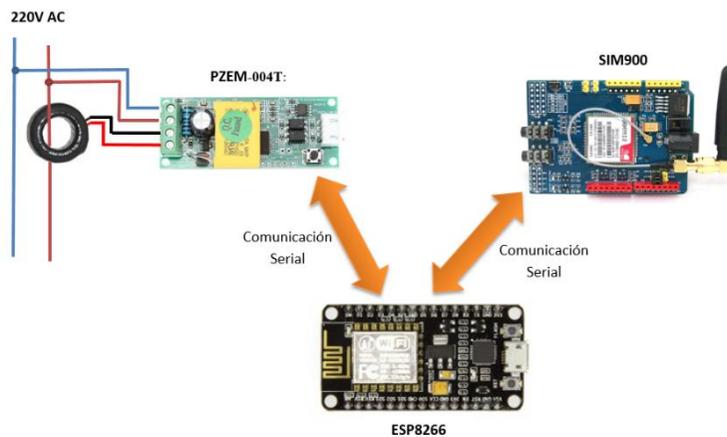


Figura VI – Estructura Operativa del sistema de medición

El proceso de obtención de datos se lleva a cabo de la siguiente manera:

En primer lugar, el sensor de corriente y voltaje censa la línea de entrada de energía eléctrica del domicilio, este dispositivo utilizando un circuito electrónico dedicado, procesa la información y la envía mediante una comunicación serial al módulo del microcontrolador ESP8266, este es capaz de interpretar los datos y generar la trama que será enviada al servidor en Internet.

Dicha trama es enviada por otro puerto de comunicaciones seriales al módulo transceptor SIM900, siendo este el encargado de conectarse vía inalámbrica con la red GPRS correspondiente al operador de la red celular acorde al chip GSM que se haya instalado, este último lleva la información a internet y por consiguiente al servidor en cuestión donde se almacenaran y procesaran los datos, obteniendo como resultado la información necesaria para poder decidir qué acciones son las más adecuadas para recomendarle al usuario en pro de reducir el consumo eléctrico.

**3.2. Costo del dispositivo.-** En la tabla I se detalla el costo en dólares americanos de cada uno de los componentes utilizados para crear el prototipo.

Ítem	Costo
PZEM-004T	USD 5.00
sim900	USD 17.00
ESP8266	USD 5.00
gabinete	USD 3.00
cables y misceláneas	USD 2.00
Total	USD 32.00

*Tabla I.- Costos de los componentes del dispositivo.*

**3.3. Pruebas técnicas.-** El primer objetivo fue verificar el correcto funcionamiento de todo el sistema en conjunto, incluyendo el dispositivo de medición, la red de comunicaciones y el servidor junto con la base de datos alojada en la nube donde se almacena, procesa y accede a la información de telemetría.

Luego de esto se procedió a validar si la información recolectada en las pruebas podría ser de utilidad para comprender patrones de consumo eléctrico de parte del usuario que puedan asociarse a oportunidades de ahorro. Esto se realizó a través del análisis de los datos de consumo recogidos y su relación con algunos de los casos de uso expuestos en la primera parte del trabajo.

En este siguiente apartado se explican en detalle las pruebas técnicas realizadas para corroborar el correcto funcionamiento del dispositivo desarrollado y se muestran los resultados de los análisis de datos realizados sobre la información recolectada.

**3.3.2. Preparación de las pruebas.-** Se planificó la realización de pruebas en dos domicilios diferentes de la Ciudad de Córdoba, Argentina durante un mes completo. Ambos domicilios contaban con servicio eléctrico monofásico de 220 V.

#### Conexión del dispositivo

El dispositivo se conectó con su bobina toroide al cable de vivo del hogar, con el fin de medir la potencia consumida. El diagrama de conexión se ilustra en la figura VII:

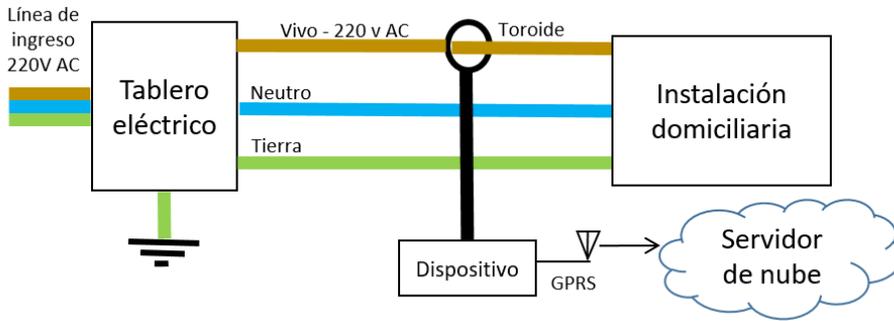


Figura VII.– Esquema de conexión de dispositivo de lectura.

Las mediciones efectuadas por el dispositivo se enviaron a través de un canal de conexión GPRS de un proveedor de telefonía celular, mediante el uso del protocolo MQTT, al servidor de nube para que almacene los datos en la base de datos.

Al finalizar el período de prueba se realizó una exportación de datos a formato de texto .csv y se utilizó la herramienta Tableau en su versión pública [12] para realizar los análisis pertinentes. El archivo de datos contiene un registro por cada medición, con el siguiente formato:

- El primer campo indica la fecha, Formato dd/mm/aaaa.
- El segundo campo contiene el horario de la medición en formato hh:mm de 24 hs.
- El tercer campo muestra la potencia real, calculada a través de la medición de corriente instantánea medida en el dispositivo.

**3.3.3. Perfil de consumo de los domicilios.-** La tabla II muestra los dispositivos existentes en cada uno de los domicilios.

DOMICILIO 1	DOMICILIO 2
Heladera	Heladera
Televisores Led (3)	Freezer
Horno Microondas	Televisores Led (3)
Pava eléctrica	Horno Microondas
Lavarropas	Horno Eléctrico
Computadora Personal	Pava eléctrica
Notebooks (2)	Lavarropas
Aire Acondicionado Frio/Calor (2)	Freidora
Calefactor eléctrico (1)	Computadora Personal
Luminarias Bajo consumo (15)	Notebooks (3)
Central de alarma	Aire Acondicionado Frio/Calor (1)
Router Wifi (1)	Calefactor eléctrico (2)
Celulares/Tablets con cargadores (3)	Luminarias Bajo consumo (20)
	Central de alarma
	Router Wifi (1)

Tabla II.– Dispositivos eléctricos por domicilio.

### 3.3.4 Desarrollo de las pruebas.-

#### Pruebas en Domicilio 1

El período de recolección de datos: Desde el 01/05/2018 18:10 al 31/5/2018 23:59 en intervalos de 1 minuto por medición. Trascurrido este período se analizaron las mediciones y se obtuvieron los siguientes resultados ilustrados en la figura VIII:

En primera instancia se obtiene la curva de consumo de ambos períodos en promedios diarios de consumo, visualizando en dos colores diferentes según sea Día hábil o Feriado.

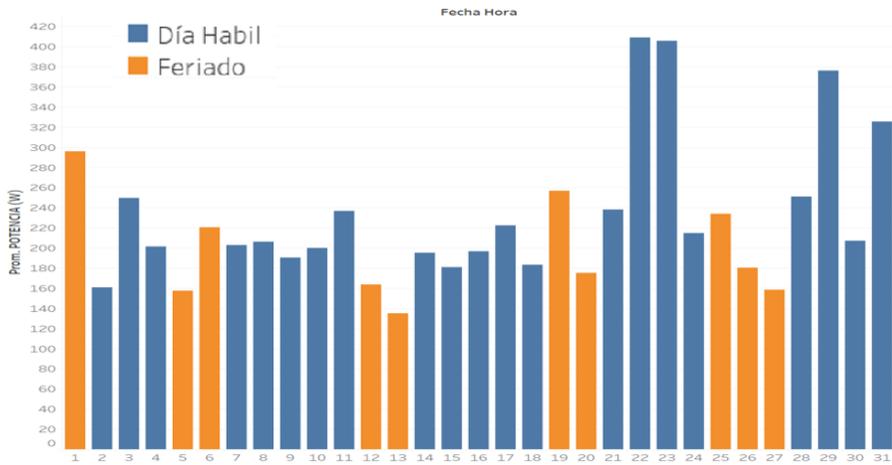


Figura VIII.– Energía total consumida en el día – Domicilio 1.

A priori se observa que el consumo de los días hábiles en general es mayor que en los feriados y que el consumo tiende a subir hacia fin de mes. Por tratarse de un mes de otoño es posible que esto esté mostrando mayor uso de sistemas de calefacción eléctrico. Se verifica que el día de menor consumo fue el 13/5 (sábado) y el de mayor consumo el 22/5 (lunes).

Se procede luego a analizar la curva de consumo según la hora del día, tanto para días hábiles como para días feriados (Figura IX) donde se visualizan 3 momentos de picos, coincidentes con las 6:00, las 11:00 y las 20:00 hs, siendo el de las 11:00 el más alto con 300 W. Por otra parte, el consumo menor se presenta a las 5:00, 9:00 y 17:00 hs. con menos de 150 W promedio. Cuando se analiza el gráfico disgregado por día hábil y feriados se observan las siguientes características:

- Pico máximo día hábil : 20 hs – 450W
- Pico máximo feriado : 18 hs - 250 W
- Primer pico día hábil : 06 hs – 270 W (despertar)
- Primer pico día feriado : 09 hs. 220 W (despertar)
- Consumo mínimo día hábil : 05 hs. – 150 W
- Consumo mínimo feriado : 08 hs. – 130 W

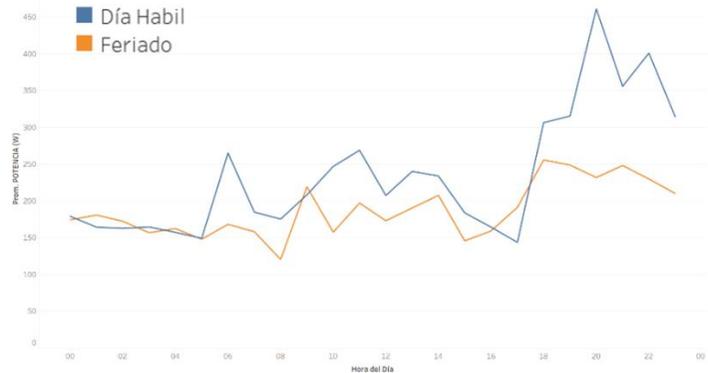


Figura IX.– Consumo promedio por hora del día – Domicilio 1.

Por último, se realizaron análisis de consumo en 3 días determinados (mayor consumo, menor consumo y cercano al promedio) en busca de patrones que puedan indicarnos perfiles o conductas de consumo.

En el primer día analizado (mayor consumo) ilustrado en la figura X se pueden detectar algunos datos importantes, a saber.

El consumo mínimo de este hogar rondaría los 100 W, que formaría parte de los dispositivos “siempre encendidos” como por ejemplo luz de led testigo de dispositivos electrónicos, routers de Internet, sensores de alarmas, etc. (flecha roja)

Se puede visualizar la curva de consumo de la heladera, en especial durante las horas de la madrugada, ya que es el único elemento inductivo que permanece encendido y se activa por períodos casi constantes en el tiempo (flecha verde).

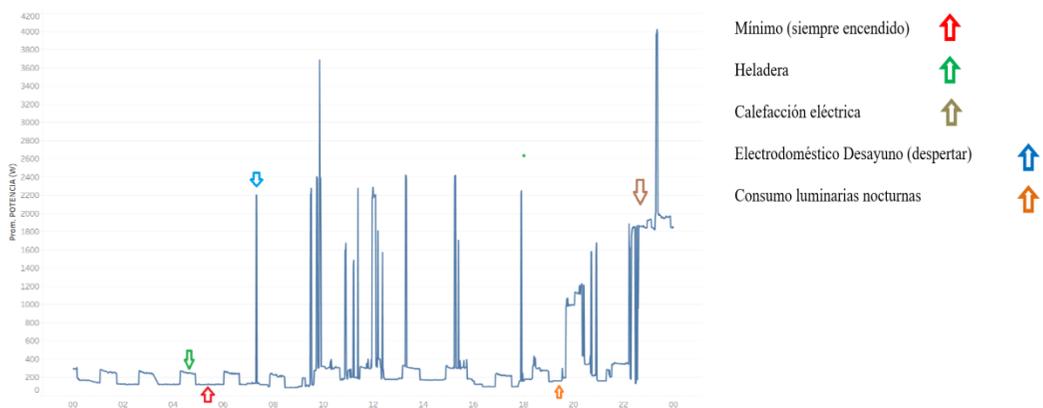


Figura X.– Día de mayor consumo – martes 22/5 – Domicilio 1.

Adicionalmente se puede inferir el consumo de los elementos lumínicos del hogar, dados por la diferencia en los valles de la curva de consumo a partir de las 19:30 hs., y los producidos en horarios diurnos (flecha naranja).

Los picos en forma de aguja parecen ser elementos de alto consumo, quizás asociados a calefacción eléctrica o electrodomésticos hogareños. El primer pico del día se infiere como electrodoméstico de desayuno (flecha azul).

Los altos consumos nocturnos hacen referencia a la calefacción eléctrica, más teniendo en cuenta la época del año (flecha marrón).

Se analizan luego otros días subsiguientes para corroborar si se repiten las observaciones.

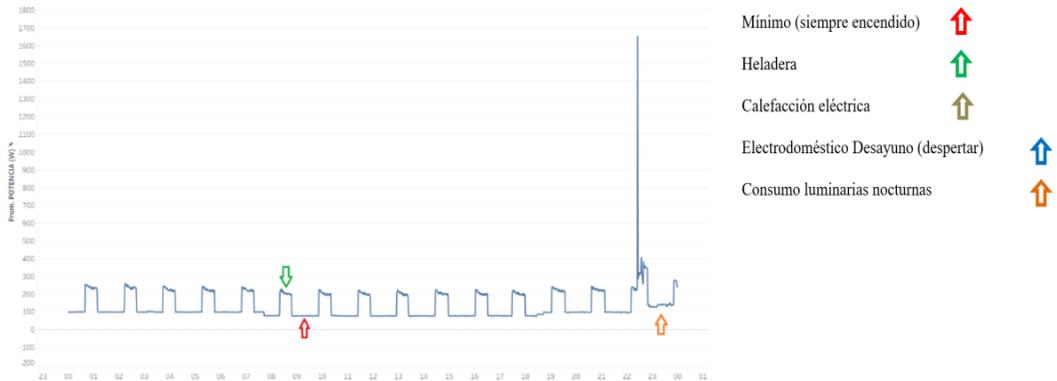


Figura XI.– Día de menor consumo – domingo 13/5 – Domicilio 1.

Al observar la curva del día de menor consumo (13/5) en la figura XI se observa que el primer consumo en forma de aguja recién se verifica pasadas las 22:00 lo que podría indicar ausencia del hogar de las personas durante el día. Se corrobora patrón de consumo de la heladera, el consumo mínimo y el patrón de luces encendidas.

Por último, se analizó un día que presentara un valor de consumo cercano al promedio. En este caso se eligió el 10/05 (jueves) ilustrado en la figura XII.

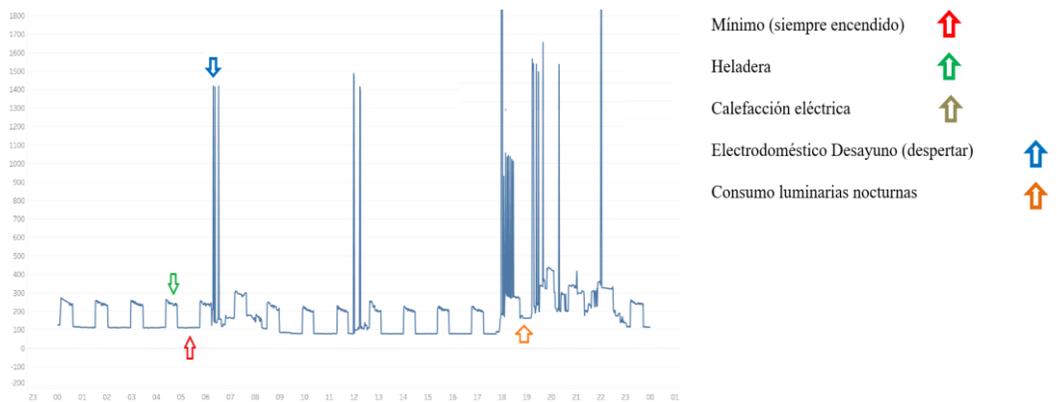


Figura XII.– Consumo del día jueves 10/5 – Domicilio 1.

Se corrobora patrón de consumo de la heladera como así también consumo mínimo. Se observan patrones de consumo en forma de aguja por la mañana (desayuno) y consumo lumínico nocturno (flecha naranja) como piso elevado a partir del anochecer (19 hs.)

A partir de las observaciones obtenidas se podría comenzar a inferir el consumo de los dispositivos hogareños, por ej. en este caso se observa que los dispositivos que siempre permanecen encendidos en este hogar tienen un consumo aproximado de 50 W y la heladera unos 100 W cada vez que enciende el motor.

### Confiabilidad del sistema

Se procedió a analizar la cantidad de minutos en el período sobre el cual no se pudieron contar con mediciones. En la tabla III se muestra el grado de asertividad de las mediciones.

Total	42110
Efectivas	35206
Errores	6904
Porcentaje de eficiencia	83,60%

*Tabla III.– Mediciones efectivas – Domicilio 1.*

Se pudo observar momentos en los cuales no se registran mediciones, siendo el porcentaje de mediciones obtenidas sobre el total de mediciones posibles de 83,60%.

Si bien este nivel de asertividad es más que suficiente para el objetivo de un medidor hogareño de bajo costo, donde su principal función es el de dar a conocer a usuario información de consumo que sirva para optimizar el uso de la energía eléctrica, de cara a la segunda prueba se evaluaron acciones tendientes a mejorar esta tasa de efectividad.

En primer lugar, se buscó incrementar la confiabilidad del dispositivo a fin de aumentar los valores de eficiencia, para de este modo lograr un correcto análisis de consumo. Para ello se realizaron mejoras en el firmware tendientes a incrementar la seguridad en la comunicación de los datos.

Por otra parte, se evaluó la posibilidad de aumentar el tiempo de recolección de datos. Realizando el análisis de las mediciones recolectadas se verifica que es posible realizar una correcta interpretación de los mismos aun cuando el intervalo de medición pase de 1 minuto, como el implementado en las pruebas en el domicilio 1, a 5 minutos.

A pesar de que hay una pérdida de datos en las mediciones estas aún son suficientes para el análisis y redunda en importantes beneficios para el sistema, en primera instancia al utilizarse comunicaciones móviles para el envío de datos, las mismas están tarifadas en relación a la cantidad de información transferida, con este nuevo intervalo de medición esta se reduce en cinco veces.

Otro importante beneficio derivado del aumento en el intervalo de medición es que si se trata de un sistema de medición a gran escala con gran cantidad de sensores se estaría en presencia de un importante volumen de datos con los consabidos costos para almacenar los mismos en los servidores, es por ello que una reducción en la cantidad de datos también llevaría asociada una

reducción en los costos de almacenamiento, y si ello no afecta el rendimiento del sistema es evidente que se deben incluir estas mejoras.

### Pruebas en Domicilio 2

Período de recolección de datos: Desde el 01/08/2018 00:00 a 31/08/2018 23:59 en intervalo de 5 minutos entre mediciones.

Para comenzar se analizó la curva de promedios diarios de consumo en el mes, visualizando en dos colores diferentes según sea Día hábil o Feriado. Ilustrado en la figura XIII.

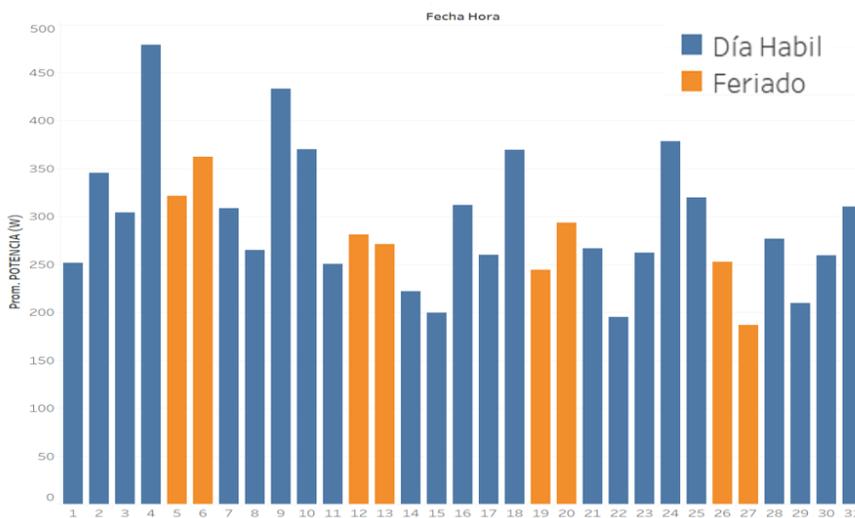


Figura XIII.– Energía total consumida en el día – Domicilio 2.

Al igual que en el primer domicilio el valor observado en los días hábiles en general es mayor que en los feriados, pero en este caso se ve que consumo tiende a bajar hacia fin de mes. Por tratarse del mes de agosto es posible que esto esté mostrando un menor uso de sistemas de calefacción eléctricos en los últimos días del mes. Se verifica además que el día de menor consumo es el 27/8 (domingo) y el de mayor consumo el 4/8 (viernes).

Luego de esto se continuó con el estudio de la curva de consumo promedio según la hora del día, tanto para días hábiles como para días feriados ilustrado en la figura XIV. Para el caso de los días hábiles se visualizan 3 momentos de picos, coincidentes con las 8:00 hs., las 13:00 hs. y las 21:00 hs., siendo este último el más alto con 550 W.

Como contraparte, el menor consumo se presenta a las 06:00 hs. con menos de 150 W promedio y para el caso de los días feriados sólo se presenta un pico marcado en horario nocturno.

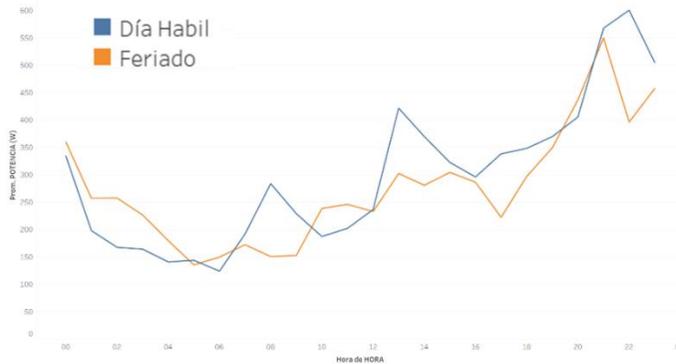


Figura XIV.– Consumo promedio por hora del día – Domicilio 2.

Para finalizar se revisaron las curvas correspondientes a 3 días determinados (el de mayor consumo ilustrado en la figura XV, el de menor ilustrado en la figura XVI y el de un día cercano al promedio ilustrado en la figura XVII) en busca de patrones que puedan indicarnos perfiles o conductas de consumo. Los resultados son los siguientes:

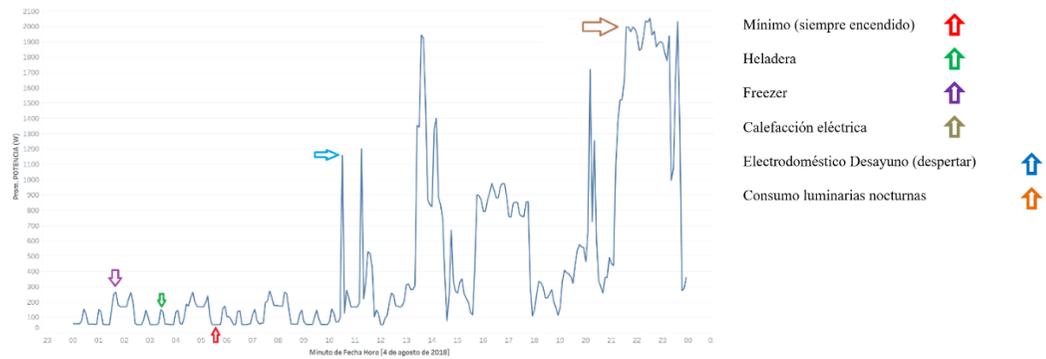


Figura XV.– Día de mayor consumo – viernes 4/8 – Domicilio 2.

En el primer día analizado se pueden detectar algunos datos importantes, a saber.

- 1) El consumo mínimo de este hogar está alrededor de 100 W, conformado por los dispositivos “siempre encendidos” como por ejemplo luz de led testigo de dispositivos, routers de Internet, sensores de alarmas, etc (flecha roja).
- 2) Se puede inferir claramente el perfil de consumo de las heladeras y el freezer, en especial durante las horas de la madrugada, ya que son los únicos elementos inductivos encendidos y se activan por períodos casi constantes en el tiempo (flecha verde y morada).
- 3) Los picos en forma de aguja parecen ser elementos de alto consumo, quizás asociados a calefacción eléctrica o electrodomésticos hogareños. El primer pico del día se infiere como electrodoméstico de desayuno, como pava eléctrica o cafetera (flecha azul).
- 4) Los altos consumos nocturnos hacen referencia a la calefacción eléctrica, más teniendo en cuenta la época del año (flecha marrón).

Se continuó con el análisis del resto de los días para corroborar si se repiten las observaciones.

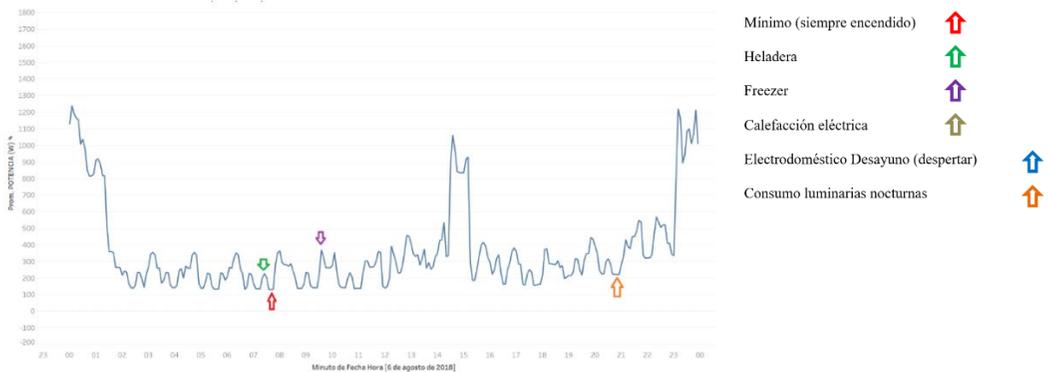


Figura XVI.– Día de menor consumo – domingo 27/8 – Domicilio 2.

En este caso se verificó nuevamente el patrón de consumo de la heladera y freezer, como así también el consumo mínimo. En cambio, no se visualizan altos patrones de consumo nocturnos (calefacción eléctrica) ni consumo en forma de aguja por la mañana (desayuno), lo que podría indicar desocupación de la vivienda hasta el mediodía. Por otra parte, se presenta el patrón de consumo lumínico nocturno (flecha naranja) como piso elevado a partir del anochecer.

Por último, se analiza la curva de consumo de un día cercano al promedio. En este caso elegimos el 16/08 (jueves).

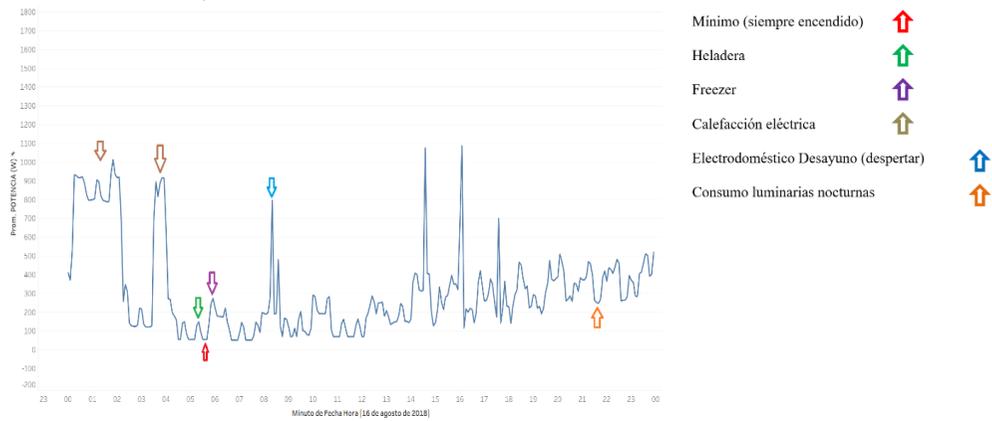


Figura XVII.– Consumo del día jueves 16/08 – Domicilio 2.

Se presenta el patrón de consumo de la heladera y el freezer como en los casos anteriores, como así también el nivel de consumo mínimo. Se observa además consumos nocturnos (calefacción eléctrica) y en forma de aguja por la mañana (desayuno). Por último, se verifica el patrón de consumo lumínico nocturno (flecha naranja) como piso elevado a partir del anochecer (20 hs.).

Como el objetivo de las pruebas no es el de realizar cálculos de consumo, sino el de demostrar que las mediciones obtenidas por el dispositivo pueden ser utilizadas para dicho fin, no se continuó con el análisis más allá de lo expuesto.

#### Confiabilidad del Sistema

Al igual que en el primer caso se procedió a analizar la cantidad de minutos en el período sobre el cual no se pudieron contar con mediciones. En la tabla IV se muestra el grado de asertividad de las mediciones.

Total	8928
Efectivas	8922
Errores	6
Porcentaje de eficiencia	99,93%

*Tabla IV.– Mediciones efectivas – Domicilio 2.*

Se puede observar una efectividad a un 99,93%, en parte por la extensión del período de muestreo de 1 a 5 minutos. Si bien al tener un mayor período entre mediciones se pierde algo de precisión, se pudo verificar que los patrones observados en el caso 1 se pueden detectar sin problemas en el segundo caso, por lo que se considera que el período de 5 minutos es totalmente aplicable para este tipo de sensores y quizás más apropiado por permitir una reducción importante de costo de transmisión y almacenamiento.

**4. Conclusiones y resultados.-** Como resultado del trabajo se ha logrado definir un prototipo técnico de recolección y análisis de datos de consumo de energía eléctrica soportado por una arquitectura tecnológica de nube que hizo posible la colección de información en un sistema que pueda manejar grandes cantidades de datos para su posterior análisis y visualización. Todo esto ha sido realizado con tecnologías abiertas disponibles en el mercado a un costo considerablemente bajo, lo que permite ser replicado fácilmente y adaptado para su uso en hogares, edificios u organizaciones con poco esfuerzo.

Por otra parte se pudieron describir diversos casos de uso donde el análisis de los datos recolectados puedan ser aplicados en distintas acciones destinadas a conseguir un uso de la energía más eficiente, ya sea para el descubrimiento y análisis de patrones de consumo que permitan detectar anomalías o conductas inapropiadas como así también para la determinación de predicciones que posibiliten anticiparse a las demandas.

Por todo lo expuesto es deseable que este trabajo pueda ser de ayuda al abordaje de la problemática del uso de tecnología de big data para lograr eficiencia energética a través de su aplicación práctica con sistemas abiertos, y además pueda colaborar aportando entendimiento sobre algunos de las múltiples aplicaciones donde esta metodología puede aplicarse en pos de mejorar las conductas de consumo de la sociedad.

## 5. Bibliografía

- [1] Comisión Económica para Latinoamérica y el Caribe (CEPAL). “Indicadores de políticas públicas en materia de eficiencia energética en América latina y el Caribe”, 2010
- [2] Martínez A. P. “Modelo de predicción de la demanda eléctrica mediante regresión dinámica”. Universidad Politécnica de Madrid, España, 2015
- [3] González-Avella J.C y Tuduri J.M., “Análisis de series temporales usando redes neuronales”. Bareales, España, 2017.
- [4] Gabriel Natán Pizarro Herrera, “Reconocimiento de patrones y pronóstico de consumo eléctrico”. Universidad Católica De Valparaíso, Chile 2017.
- [5] Santiago de la Fuente Fernandez, “Series Temporales: Modelo ARIMA”. Universidad Autónoma de Madrid. España, 2013.
- [6] Guillermo Beyrne, Facundo Malvicino, Luis Alberto Trajtenberg. “Modelo Estacional de Demanda de Energía Eléctrica”. Secretaría de Política Económica y Planificación del Desarrollo, Argentina 2015.
- [7] Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), Base de datos Open Source para series temporales. <https://docs.influxdata.com/influxdb> , 2018.
- [8] Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), Framework para desarrollo de aplicaciones Web PHP. <https://laravel.com/docs> , 2018.
- [9] MariaDB Foundation, Proyecto de Base de Datos relacional. <https://mariadb.org/documentation/> , 2018.
- [10] Oracle Corp., Proyecto de Base de Datos relacional Open Source. <https://www.mysql.com/docs>, 2018.
- [11] Arduino AG., Plataforma de creación de electrónica de código abierto. <https://www.arduino.cc/>, 2018.
- [12] Tableau Software LLC., Plataforma gratuita en línea para explorar visualizaciones de datos. <https://public.tableau.com/>, 2018.

# Sistema de Reconocimiento de Señalamientos en Entornos Abiertos para la Orientación de Personas con Discapacidad Visual

*Signage Recognition System in Open Environments for the Visually Impaired*

Yesenia González<sup>1</sup>, Alejandro Millán<sup>2</sup>, Yuli Sánchez<sup>3</sup>, Claudia Ortiz<sup>4</sup>, Miguel Alemán<sup>5</sup>, Carlos Hernández<sup>6</sup>

Recibido: Julio 2020

Aceptado: Diciembre 2020

**Resumen.**– En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo que permite identificar señalamientos específicos a través de técnicas de visión artificial. Utiliza una etapa de segmentación de imagen basada en el algoritmo de superpíxeles SLIC, seguida de una etapa de reconocimiento y clasificación de señalamientos basada en redes neuronales convolucionales que se ha implementado en un ordenador de placa reducida (SBC). El prototipo informa al usuario de la identificación de estos señalamientos a través de un mensaje de audio enviado a un auricular, cuenta con un módulo GPS que obtiene la ubicación donde se reconoció el señalamiento y se almacena para ofrecer al usuario notificaciones sobre señalamientos cercanos. Las pruebas fueron realizadas con señalamientos a escala 1:2 en entornos abiertos, con luz de día. El prototipo pretende ser un apoyo para que personas con discapacidad visual puedan desplazarse en entornos abiertos urbanos. Tiempos de procesamiento y desempeño del prototipo son reportados. Si bien la implementación en el ordenador de placa reducida seleccionado hace inviable su uso por los tiempos de operación, se demuestra la funcionalidad del sistema.

**Palabras clave:** Señalamientos, algoritmo SLIC, redes neuronales convolucionales, ordenador de placa reducida, GPS, personas con discapacidad visual.

**Summary.**– *This work presents the development of a prototype that allows identifying specific signs through artificial vision techniques. It uses an image segmentation stage based on the SLIC superpixel algorithm, followed by a sign recognition and classification stage based on convolutional neural networks and has been implemented in a simple-board computer (SBC). The prototype informs the user of the identification of these signs through an audio message sent to headphones, it has a GPS module that obtains the location where the sign was recognized and is stored to offer the user notifications about nearby signs. The tests were performed with 1: 2 scale signs in open spaces, with natural light. The prototype is intended as a support for visually impaired people to move in open urban environments. Processing times and prototype performance are reported. Although the implementation in the selected simple-board computer makes its use unfeasible due to operating times, the functionality of the system is demonstrated.*

**Keywords:** Signs, SLIC algorithm, convolutional neural networks, simple-board computer, GPS, people with visual disabilities.

<sup>1</sup> Doctora en Ciencias, UPIITA - Instituto Politécnico Nacional, ygonzalez@ipn.mx ORCID iD: 0000-0003-2370-4660

<sup>2</sup> Ingeniero, UPIITA - Instituto Politécnico Nacional, amillan1500@alumno.ipn.mx, ORCID iD: 0000-0002-0789-1112

<sup>3</sup> Ingeniera, UPIITA - Instituto Politécnico Nacional, yuliyulivani@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-9744-4614

<sup>4</sup> Ingeniera, UPIITA - Instituto Politécnico Nacional, alejandra.ortiz1404@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-5314-9488

<sup>5</sup> Doctor en Ciencias, CNMN - Instituto Politécnico Nacional, maleman@ipn.mx, ORCID iD: 0000-0001-6234-8406

<sup>6</sup> Maestro en Ciencias, UPIITA - Instituto Politécnico Nacional. hernandeznc@ipn.mx, ORCID iD: 0000-0002-2417-9020

**1. Introducción.**– La discapacidad, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) es un término general que abarca deficiencias en alguna función corporal de un individuo y que conlleva a limitaciones para que este pueda realizar acciones, por lo que se limita su participación en la sociedad donde vive [1]. En México, en un comunicado de prensa realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, por su acrónimo), 7.7 millones de personas de 5 años o más presentan discapacidad [2]. El INEGI ha desarrollado una estructura de clasificación de tipo de discapacidad, siendo uno de los tipos, las discapacidades sensoriales y de la comunicación y a su vez, un subgrupo de estas, son las discapacidades para ver [3]. Las discapacidades para ver se refieren a la pérdida total de la visión, a la debilidad visual (personas que solo ven sombras o bultos) y a limitaciones que no pueden ser superadas con el uso de lentes. Según el INEGI, de la población en México de 5 años o más con discapacidad, 39.6 % presenta discapacidad para ver [2].

Cuando existe una limitación visual, desplazarse de un lugar a otro o conocer nuevos entornos presenta un desafío, lo que puede comprometer su seguridad. La movilidad o capacidad para desplazarse con independencia implica el aprendizaje de técnicas que permiten a la persona con discapacidad visual caminar en línea recta, seguir referencias, cruzar calles y utilizar el transporte público [4]. De acuerdo con una publicación especial de la Unión Latinoamericana de Ciegos (ULAC) en el 2018, los temas presentados seguían abordando los problemas de las personas con discapacidad para el acceso a la tecnología [5]. Circunstancias de carácter económico, cultural y político: limitaciones económicas para la compra de productos de apoyo, no contar con políticas públicas o que ni siquiera se considere como algo fundamental para las personas con discapacidad, que cuenten con las herramientas y destrezas para ser autónomos e independientes.

Tradicionalmente se han desarrollado sistemas de ayuda electrónica para la movilidad de personas con discapacidad visual. Se han propuesto bastones en los que se integran sistemas de detección de obstáculos por ultrasonido o láser e informan al usuario mediante tonos musicales o incluso mediante señales tacto-vibrátiles [6-8]. Otro campo explorado ha sido utilizar técnicas de visión artificial para reconocer los señalamientos de interés [9-11]. Con los avances en años recientes de técnicas de visión artificial basadas en redes neuronales de aprendizaje profundo [12-13], se han propuesto trabajos que utilizan estas arquitecturas, algunos de ellos operando en ambientes interiores, ambientes controlados y/o fondos claros [14] y otros, para ambientes en exteriores, como lo que se busca en este trabajo [15-17].

Para el desarrollo del prototipo propuesto, se realizó una encuesta a un grupo de estudiantes con ceguera pertenecientes al Comité Internacional Pro Ciegos IAP ubicado en la colonia Santa María la Ribera en la Ciudad de México [18]. Dicha encuesta se enfocó a la factibilidad de uso de un sistema de reconocimiento de señalamientos para su desplazamiento en ambientes urbanos nuevos, el tipo de accesorio donde preferirían que estuviera montado, si preferían que estuviera como aplicación en un teléfono celular inteligente o que fuera un dispositivo específico, el costo que podrían pagar por un equipo de esta naturaleza. Datos relevantes como la dificultad para manejar teléfonos celulares inteligentes y el costo que podrían pagar restringen entonces la propuesta de solución.

Este trabajo propone el desarrollo e implementación de un sistema portátil de bajo costo capaz de reconocer una selección de señalamientos en entornos abiertos y con luz de día, con el fin de facilitar la orientación y movilidad de las personas con discapacidad visual cuando se desplazan por nuevos entornos. El sistema no requiere de un entrenamiento por parte del usuario para su uso. Realiza notificaciones de audio mediante audífonos 3.5 mm, de esta forma el usuario no depende de audífonos especialmente diseñados para el sistema, que limitarían su uso, sino que puede emplear audífonos comerciales. Otra característica importante que presenta el proyecto es la de

ofrecer notificaciones sobre señalamientos cercanos que hayan sido identificados anteriormente, por lo que se utiliza un módulo de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) [19].

**2. Trabajos relacionados.**– Con el objetivo de apoyar en la autonomía de las personas con discapacidad visual, se han desarrollado diversos trabajos que utilizan técnicas de visión artificial. Con respecto a las técnicas de visión artificial basadas en redes neuronales de aprendizaje profundo, un tipo de redes actualmente muy utilizada para el procesamiento de imágenes son las redes neuronales convolucionales (CNN), que como su nombre indica, realiza una operación de convolución entre la entrada de la red (comúnmente un arreglo multidimensional de datos) y diferentes filtros o kernels (arreglos multidimensionales de parámetros). Existen varias arquitecturas estándar, tales como AlexNet [20] o VGGNet [21], dichas arquitecturas proponen diferentes tipos de parámetros y capas. Mientras que para AlexNet el tipo de filtros usados suele ser grande ( $11 \times 11$ ), la red VGGNet propuesta en [21] utiliza un tamaño de filtros menor ( $3 \times 3$ ). En [15], al igual que el trabajo aquí propuesto, tienen limitación en el hardware a utilizar, por lo que proponen y prueban diferentes arquitecturas basadas en la red VGGNet, pero disminuyendo el número de capas y filtros a utilizar; también disminuyen el tamaño de las imágenes de entrada ( $32 \times 32 \times 3$ ).

Los trabajos desarrollados en [15] y [16], proponen una etapa previa a la red neuronal convolucional, donde se lleve a cabo una búsqueda de regiones de interés en la imagen de entrada y serán estas regiones las que ingresen posteriormente a la red neuronal convolucional para el reconocimiento y clasificación del señalamiento. En [15], se utiliza el algoritmo de segmentación “Crowcut” propuesto en [22], mientras que en [16] utilizan una combinación de el algoritmo de Histograma de Gradientes (HOG) [23] y el algoritmo “Speed Up Robust Features” (SURF) [24]. En contraste, en [17], la red neuronal convolucional utilizada recibe las imágenes de entrada, pero en su etapa de entrenamiento, a las imágenes utilizadas se les aplica un proceso de etiquetado en las regiones de interés.

**3. Metodología.**– El sistema debe de identificar 27 señalamientos (ver Figura I) cuya selección fue realizada con base en dos criterios: Las necesidades de un grupo de estudiantes con ceguera entrevistados y en aquellos señalamientos que es posible encontrar disponibles actualmente en la Ciudad de México. El sistema es apto solo para residentes de la Ciudad de México debido a que las normativas que rigen los señalamientos varían dependiendo de la localidad.

El término señalamiento o señalamiento vertical se refiere a aquellas señales construidas en tableros con leyendas y pictogramas fijadas en postes, marcos y otras estructuras. Según su propósito, estas señales se clasifican en: señales restrictivas, señales preventivas, señales informativas, señales turísticas y de servicios. Tienen como función reglamentar, informar y advertir acerca de las condiciones de rutas, direcciones y destinos donde transitan los usuarios, esto con la finalidad de salvaguardar la seguridad de estos. Cada señalamiento debe cumplir con características predefinidas en lo referente a forma, diseño, color, dimensión, tamaño y forma de letras, pictograma y símbolo, estas características se encuentran reglamentadas en la Ciudad de México por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes a través del Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad [25].



Figura I.- Señalamientos a reconocer.

Sobre la propuesta de solución, esta también fue influenciada por el grupo de personas encuestadas, como ya se mencionó en la Introducción. La solución propuesta es un sistema portable capaz de reconocer señalamientos en entornos abiertos, a través de técnicas de visión artificial y haciendo uso de un ordenador de placa reducida (Raspberry Pi 3). Las imágenes son obtenidas desde una cámara conectada al ordenador de placa reducida (SBC), el cual tiene a su vez conectado un Arduino UNO con un módulo GPS, que permite conocer la ubicación del usuario al momento de reconocer un señalamiento, con la finalidad de ofrecer al usuario notificaciones auditivas a través de un audífono sobre señalamientos cercanos a su ubicación. En la Figura II se puede observar la arquitectura propuesta para el sistema.

La descripción de la función que realiza cada uno de los componentes físicos del sistema se describe a continuación:

- Cámara: Dispositivo a través del cual se realiza la captura del video.
- Raspberry Pi 3: Dispositivo donde se lleva a cabo la detección y clasificación del señalamiento, así como la comparación de las ubicaciones almacenadas y obtenidas del GPS. En este dispositivo se encuentra alojada la base de datos utilizada para el almacenamiento de los señalamientos identificados con anterioridad, así como los mensajes pregrabados que se reproducen en los audífonos.
- Módulo GPS: Módulo a través del cual se obtiene la ubicación actual del usuario.
- Arduino UNO: Dispositivo que recibe la ubicación del usuario (latitud y longitud), del módulo GPS y la envía al ordenador de placa reducida para su comparación y almacenamiento.
- Audífonos: Dispositivos a través de los cuales se reproduce el mensaje de audio seleccionado.

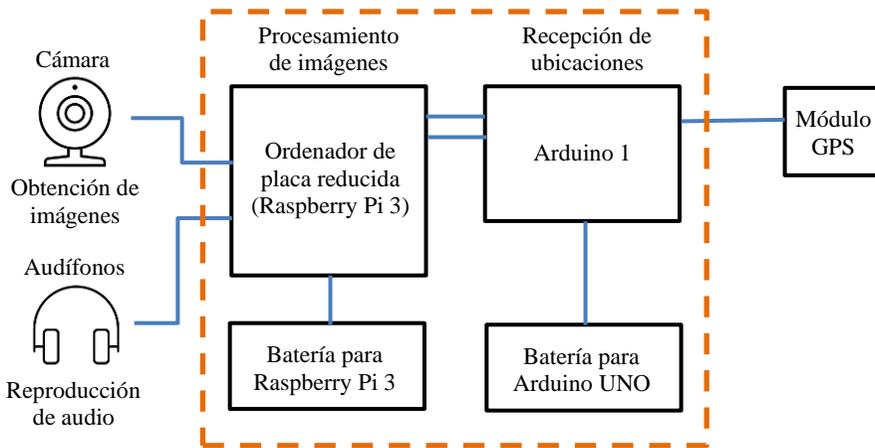


Figura II.- Arquitectura del sistema de detección de señalamientos.

El funcionamiento del sistema se describe a continuación: el usuario inicia el sistema, posteriormente la cámara va realizando la captura de imágenes, el ordenador de placa reducida (SBC) las recibe y realiza la detección y clasificación de un señalamiento siempre y cuando este se encuentre en la lista de señalamientos definidos para el sistema. Una vez identificado el señalamiento, se selecciona un mensaje de audio que contiene el tipo de señalamiento y este mensaje se reproduce en los audífonos para que el usuario pueda escucharlo. También se obtiene la ubicación donde se encuentra el usuario que envía el módulo GPS a través del Arduino Uno y se compara con las ubicaciones donde se identificó algún señalamiento con anterioridad (almacenadas en la base de datos). Si se encuentra alguna coincidencia de ubicación entre el usuario y los datos almacenados, se selecciona el mensaje de audio que contenga el tipo de señalamiento vinculado a la ubicación almacenada, en caso contrario, se actualiza la base de datos con la ubicación del usuario, así como el tipo de señalamiento identificado.

A continuación, se detallan cada una de las etapas del sistema:

**3.1. Ubicación.**— La ubicación del usuario es obtenida mediante el módulo de GPS Ublox NEO-6M, que se comunica a través del puerto serial UART. Esta presentación modular es compatible con algunas plataformas como Arduino, Raspberry Pi o Laptop. Algunos de los parámetros que mide son latitud, longitud, velocidad y altitud. El módulo GPS se conecta a una placa de Arduino UNO.

Para obtener latitud y longitud del usuario, se hace uso de la biblioteca TinyGPS [26] que permite almacenar los valores de latitud y longitud en variables de tipo flotante. Estas variables se convierten a variables de tipo carácter y se concatenan para enviar a la tarjeta Raspberry una única cadena de texto. El envío de la cadena de texto a la Raspberry se realiza de manera alámbrica a través del bus I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuits*), donde la Raspberry es el maestro y el Arduino el esclavo. La Raspberry recibe la cadena que a su vez se divide en dos cadenas de longitud determinada. Posteriormente estas cadenas se asignan a latitud y longitud respectivamente, y se realiza una conversión de variables de tipo cadena (*string*) a flotante para realizar las comparaciones de distancias en búsqueda de señalamientos cercanos.

**3.1.1. Búsqueda de señalamientos cercanos.**– Para la búsqueda de señalamientos cercanos, primero se obtiene la longitud y latitud del usuario a través del Arduino y se asigna a una variable “ubicación 1”. Posteriormente se obtienen cada una de las longitudes y latitudes de los señalamientos almacenados en la base de datos y se van asignando a “ubicación 2”. Para cada una de las ubicaciones obtenidas de la base de datos se realiza el cálculo de la distancia entre la “ubicación 1” y la “ubicación 2”. La distancia entre las ubicaciones dadas se obtiene en metros y se asigna a una variable distancia. Cada una de las distancias obtenidas se almacena en un arreglo que es ordenado de menor a mayor, y se selecciona la primera distancia en el arreglo que se encuentre entre 10 y 30 metros. De acuerdo con el señalamiento identificado, se reproduce el audio correspondiente.

**3.1.2. Almacenamiento de la ubicación.**– Una vez que el algoritmo de procesamiento identifica un señalamiento, se realiza una inserción en una tabla de la base de datos, de la ubicación actual del usuario (latitud y longitud) y el tipo de señalamiento identificado.

**3.2. Obtención y procesamiento de la imagen.**– A través de la cámara se capturan las imágenes para después ser analizadas en busca de señalamientos, este dispositivo debe ser colocado sobre el usuario en conjunto con todo el sistema, por lo que se busca un tamaño reducido y bajo peso, sin que esto se vea reflejado en una baja resolución, además debe ser compatible con sistemas operativos basados en Linux. Por sus características, se seleccionó el modelo *Camera Module v2*.

En esta etapa se lleva a cabo el proceso de adquisición y adecuación de las imágenes para el reconocimiento y clasificación de los señalamientos como se muestra de manera general en la Figura III. Debido a la consideración de utilizar dispositivos portátiles de bajo costo, para el sistema de visión se buscó aprovechar el desempeño que ofrecen las redes neuronales convolucionales, pero buscando arquitecturas de red con pocas capas, para lograr su ejecución en los dispositivos seleccionados. Uno de los principales trabajos consultados es el de Zanetti [15], que propone una red convolucional de 12 capas para el reconocimiento de señales de tráfico. A diferencia de otras redes convolucionales como la mencionada en [17], que a partir de una imagen de entrada de forma automática realizan la identificación de la región donde se encuentran los objetos de interés, la red utilizada en [15] recibe como imagen de entrada la región de interés, por lo que es necesaria una etapa preliminar de búsqueda de la región de interés, que en la Figura III aparece como la etapa de segmentación.

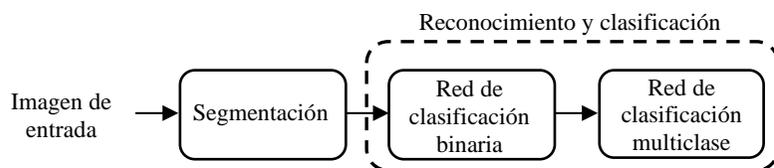


Figura III.- Proceso general de la etapa de obtención y procesamiento de imágenes.

**3.2.1. Segmentación.**– Una vez adquirida la imagen en formato de color RGB, con una resolución VGA de 640 × 480 píxeles y con el objetivo de encontrar regiones de interés dentro de la imagen donde pueda estar localizado algún señalamiento, se propuso utilizar un algoritmo de superpíxeles [27-28]. El término de superpíxel fue introducido en 2003 [29] y se refiere al agrupamiento de píxeles con rasgos similares dentro de una imagen. Los superpíxeles proporcionan una manera conveniente de realizar una caracterización focal de parámetros en una imagen digital. Uno de los algoritmos investigados fue SLIC (*Simple Linear Iterative Clustering*) [30-31]. Este es un algoritmo de segmentación que genera superpíxeles a partir del color y la proximidad de píxeles

semejantes. El número aproximado de superpíxeles de tamaño semejante que se desean obtener se determina a través del parámetro de entrada  $L$ . Dicho algoritmo segmenta la imagen de entrada en  $L$  mallas cuadradas de tamaño fijo, para una imagen de  $N$  píxeles, el tamaño aproximado de cada región de la malla sería de  $N/L$  píxeles; cada región está espaciada  $S = \sqrt{N/L}$  píxeles. Los parámetros  $N$ ,  $L$  y  $S$  pueden observarse en la Figura IV.a; posteriormente se localiza el centro de cada una de estas regiones y se calculan los gradientes de todos los píxeles vecinos a este para mover el centro al vecino con el menor gradiente, esto evita que el centro de alguno de los superpíxeles se localice en un borde.

Posteriormente, cada uno de los píxeles se asocia con el centro más cercano en una región de  $2S \times 2S$  alrededor del centro localizado como se muestra en la Figura IV.b. Para realizar esta agrupación se utiliza la distancia entre píxeles y la diferencia entre los colores que representan.

Una vez que los píxeles están asociados al centro más cercano, estos se ajustan para obtener el vector medio de todos los píxeles asociados y se calcula un error residual. Esto se repite hasta que el error converge. Finalmente, con los píxeles que permanecen aislados se forma una conectividad a través de un algoritmo de componentes conectadas. El resultado final de la segmentación mediante el algoritmo SLIC se puede observar en la Figura IV.c., que presenta 3 valores distintos de  $L$ .

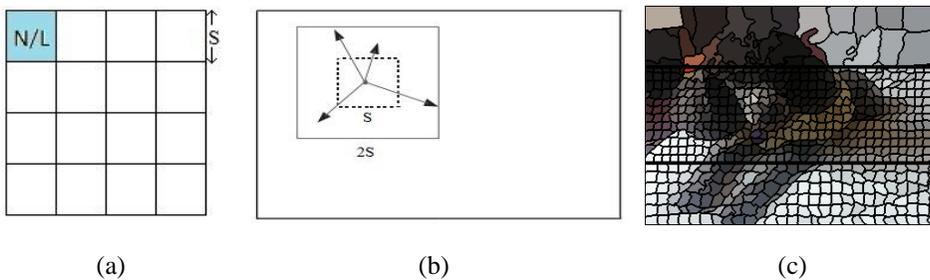


Figura III.- (a) Representación de una segmentación con  $L = 16$  mallas de una imagen. (b) Agrupación de un superpíxel. (c) Aplicación del algoritmo SLIC para la segmentación de una imagen con 3 valores distintos de  $L$ .

**3.2.2. Reconocimiento y clasificación de señalamientos.**— Para esta etapa del sistema se emplearon redes neuronales artificiales de aprendizaje profundo [12-13]. El aprendizaje profundo se considera un subcampo de los modelos de aprendizaje de máquina, el cual utiliza distintas estructuras de redes neuronales para lograr el aprendizaje mediante capas sucesivas de representaciones cada vez más significativas. Un tipo de redes de aprendizaje profundo se conoce como redes convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) y se caracterizan por ser un tipo especializado de red para procesar datos en arreglos estructurados, ya sea en una dimensión (formando un vector), o en el caso de imágenes, en dos dimensiones (arreglo de píxeles).

De acuerdo con la Figura III, previo a la etapa de reconocimiento y clasificación de señalamientos está la etapa de segmentación. Se propuso una red neuronal convolucional de clasificación binaria que analiza cada segmento de imagen generado por la etapa de segmentación y lo clasifica como señalamiento o no. Cada segmento se adecuó a una resolución de  $64 \times 64$  píxeles. La arquitectura propuesta de esta red está basada en un ejemplo del libro de F. Chollet [13] y en [15]. La Tabla I muestra la arquitectura de la red de clasificación binaria propuesta.

Capa	Entrada	Salida	Función de Activación
Convolutacional 1	64, 64, 3	64, 64, 32	ReLU
Reducción 1	64, 64, 32	32, 32, 32	
Convolutacional 2	32, 32, 32	32, 32, 64	ReLU
Reducción 2	32, 32, 64	16, 16, 64	
Convolutacional 3	16, 16, 64	16, 16, 128	ReLU
Reducción 3	16, 16, 128	8, 8, 128	
Aplanado	8, 8, 128	8192	
Desactivación aleatoria	8192	8192	
Densidad	8192	512	ReLU
Densidad	512	1	Sigmoide

Tabla I.- Parámetros de la red de clasificación binaria.

Una vez que la red de clasificación binaria detecta si el segmento analizado es un señalamiento, este segmento ingresa a una red de clasificación multiclase. La capa de salida se compone de 27 neuronas, ya que se desean reconocer 27 tipos de señalamientos. La Tabla II muestra la arquitectura de la red neuronal de clasificación multiclase. A diferencia de la red de clasificación binaria que utiliza la función Sigmoide en la capa de salida, para la red de clasificación multiclase se eligió la función de activación SoftMax.

Capa	Entrada	Salida	Función de Activación
Convolutacional 1	64, 64, 3	64, 64, 32	ReLU
Reducción 1	64, 64, 32	32, 32, 32	
Convolutacional 2	32, 32, 32	32, 32, 64	ReLU
Reducción 2	32, 32, 64	16, 16, 64	
Normalización 1	16, 16, 64	16, 16, 64	
Convolutacional 3	16, 16, 64	16, 16, 128	ReLU
Reducción 3	16, 16, 128	8, 8, 128	
Normalización 2	8, 8, 128	8, 8, 128	
Aplanado	8, 8, 128	8192	
Desactivación aleatoria	8192	8192	
Densidad	8192	256	ReLU
Densidad	256	128	ReLU
Desactivación aleatoria	128	128	
Densidad	128	27	SoftMax

Tabla II.- Parámetros de la red de clasificación multiclase.

En el caso de que una imagen adquirida por el sistema no contenga señalamientos o bien la red de clasificación binaria no detecte señalamiento en todos los segmentos analizados, no se ejecuta la red de clasificación multiclase.

**3.3. Selección y reproducción del mensaje de audio.**— Esta etapa consiste en seleccionar mediante una sentencia el audio adecuado al tipo de señalamiento, ya sea detectado o cercano. En este trabajo, los mensajes de audio que se reproducen para notificar al usuario se generaron mediante un sistema de conversión de texto a voz (CVT).

Un sistema de conversión texto a voz (CTV) es un sistema que convierte una entrada de texto en una salida en forma de señal de audio cuyo contenido se corresponde con el mensaje del texto de entrada [32]. Es decir, son sistemas que permiten la conversión de textos en voz sintética. Los conversores de texto-voz son conocidos con las siglas CTV o por las siglas en inglés TTS (Text To Speech).

Se utilizó el sistema CVT del sitio web <https://soundoftext.com>, con archivos en formato mp3, haciendo uso de voz en idioma español (México). Estos audios se almacenan en la Raspberry, donde se lleva a cabo su reproducción. La salida del audio es a través de los audífonos alámbricos 3.5 mm.

**4. Implementación y pruebas del sistema.**— Los algoritmos se ejecutaron en una computadora personal de tipo Asus TP501U con un procesador Intel Core i7-6500U CPU @ 2.50GHz, GPU NVIDIA 940MX, 12 GB de memoria RAM. El lenguaje de programación utilizado para el desarrollo de este trabajo fue Python.

**4.1. Creación del banco de datos.**— Una tarea previa al reconocimiento y clasificación de las imágenes de entrada al sistema es la creación de un banco de datos de imágenes que servirá para el entrenamiento, prueba y validación de los modelos matemáticos. Para este fin, se fabricaron señalamientos a escala 1:2 de los señalamientos originales, que cumplen con las normas del Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en cuanto a colores y posición para entornos urbanos abiertos, lo que permitió realizar las pruebas dentro de las instalaciones universitarias. Además de que se observaron diferentes problemáticas para la obtención de imágenes de señalamientos en las calles de la Ciudad de México, ya que muchos señalamientos no cumplen con las reglas de señalización y/o se encuentran en mal estado.

Para las redes neuronales convolucionales utilizadas en el sistema para la detección y clasificación de los señalamientos, se realizaron dos bancos de datos, uno para la red de clasificación binaria con un total de 12,616 imágenes y otro para la red de clasificación multiclase con un total de 6,281 imágenes.

Cada uno de los bancos de datos se realizó tomando fotografías de los 27 señalamientos propuestos para las imágenes positivas de la de clasificación binaria y las 27 categorías de la red de clasificación multiclase, así como del escenario de pruebas para las imágenes negativas de la red de clasificación binaria.

Dichas fotografías fueron tomadas en entornos abiertos, con luz de día tanto con teléfonos celulares como con la cámara seleccionada para el sistema. Después, todas las fotografías se exportaron al software Matlab, donde se realizó el etiquetado de pequeñas secciones o regiones de interés (ROIs, por sus siglas en inglés) que contienen señalamientos para las categorías positivas u objetos que se pueden encontrar en el escenario de pruebas para la categoría negativa. El etiquetado de las ROIs se realizó a través de una herramienta GUI de Matlab llamada Training Image Labeler.





Figura VI.- Imagen segmentada con el algoritmo SLIC, con  $L=30$ .

**4.3. Etapa de reconocimiento y clasificación de señalamientos.**– Para el entrenamiento de las redes neuronales convolucionales se utilizó la biblioteca de código abierto TensorFlow. Otra biblioteca utilizada fue Keras, que utiliza a TensorFlow como back-end. En la sección 4.1 se detalla la cantidad de imágenes utilizadas. El entrenamiento de ambas redes se realizó desde cero. Para la red de clasificación binaria se asignó 60 % de los datos para entrenamiento, 10 % de los datos para prueba y 30 % para validación. Para la red de clasificación multiclase, se asignó 60 % de los datos para entrenamiento, 20 % de los datos para prueba y 20 % para validación.

La Tabla IV muestra los parámetros de entrenamiento utilizados para la red de clasificación binaria y para la red de clasificación multiclase [33]. La Figura VII.a muestra la arquitectura de la red de clasificación binaria y la Figura VII.b muestra la arquitectura de la red de clasificación multiclase, ambas desplegadas desde Python.

TIPOS DE PARÁMETROS	RED DE CLASIFICACIÓN BINARIA	RED DE CLASIFICACIÓN MULTICLASE
INICIALIZACIÓN DE PESOS:	Glorot initialization method	Glorot initialization method
PÉRDIDA DE ENTRENAMIENTO:	Binary Crossentropy	Categorical Crossentropy
ACTUALIZACIONES:	RMSprop	SGD and Nesterov momentum
MOMENTO:	-	0.9
TAMAÑO DE LOTE:	32	128
DESACTIVACIÓN ALEATORIA:	-	20 %

Tabla IV.- Parámetros de entrenamiento de la red de clasificación binaria y la red de clasificación multiclase.

En la Figura VIII se muestran las curvas de desempeño de la red de clasificación binaria, usando las métricas de “exactitud” y “pérdida” (ver Tabla IV), para los datos de entrenamiento y validación. De igual manera, en la Figura IX se muestra las curvas de desempeño de la red de clasificación multiclase, para los datos de entrenamiento y validación [34]. Para ambas redes se utilizaron 200 épocas de entrenamiento.

Con base a las curvas obtenidas para ambas redes de las métricas de exactitud y pérdida, para la red de clasificación binaria se observa una ligera oscilación en las curvas del set de validación.

Pruebas más exhaustivas serían necesarias para mejorar el desempeño de la red (introducir capas de normalización, desactivación aleatoria, etc.). Con respecto a la red de clasificación multiclase, se observa un desempeño adecuado, ya que tanto las curvas de entrenamiento y de validación tienden de manera estable hacia el 100 % (en el caso de la exactitud), siendo ligeramente más baja la curva referente al set de validación. Un análisis similar puede hacerse de las curvas de pérdida. Para la red de clasificación multiclase, se incluye una matriz de confusión [34], [35], que nos brinda un análisis más detallado del comportamiento de cada clase del sistema. Se ha observado una relación en la cantidad de falsos negativos o positivos con las clases de menor número de muestras.

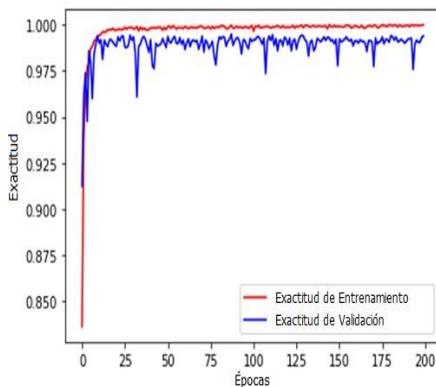
Layer (type)	Output Shape	Param #
conv2d_1 (Conv2D)	(None, 64, 64, 32)	896
max_pooling2d_1 (MaxPooling2)	(None, 32, 32, 32)	0
conv2d_2 (Conv2D)	(None, 32, 32, 64)	18496
max_pooling2d_2 (MaxPooling2)	(None, 16, 16, 64)	0
conv2d_3 (Conv2D)	(None, 16, 16, 128)	73856
max_pooling2d_3 (MaxPooling2)	(None, 8, 8, 128)	0
flatten_1 (Flatten)	(None, 8192)	0
dense_1 (Dense)	(None, 512)	4194816
dense_2 (Dense)	(None, 1)	513
Total params: 4,288,577		
Trainable params: 4,288,577		
Non-trainable params: 0		

(a)

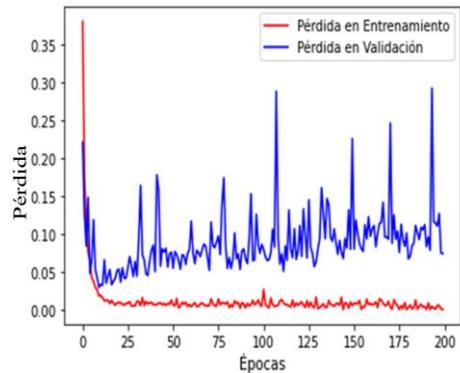
Layer (type)	Output Shape	Param #
conv2d_1 (Conv2D)	(None, 64, 64, 32)	896
max_pooling2d_1 (MaxPooling2)	(None, 32, 32, 32)	0
conv2d_2 (Conv2D)	(None, 32, 32, 64)	18496
max_pooling2d_2 (MaxPooling2)	(None, 16, 16, 64)	0
batch_normalization_1 (Batch Normalization)	(None, 16, 16, 64)	256
conv2d_3 (Conv2D)	(None, 16, 16, 128)	73856
max_pooling2d_3 (MaxPooling2)	(None, 8, 8, 128)	0
batch_normalization_2 (Batch Normalization)	(None, 8, 8, 128)	512
flatten_1 (Flatten)	(None, 8192)	0
dropout_1 (Dropout)	(None, 8192)	0
dense_1 (Dense)	(None, 256)	2097408
dense_2 (Dense)	(None, 128)	32896
dropout_2 (Dropout)	(None, 128)	0
dense_3 (Dense)	(None, 27)	3483
Total params: 2,227,803		
Trainable params: 2,227,419		
Non-trainable params: 384		

(b)

Figura VII.- (a) Despliegue de la arquitectura de la red de clasificación binaria y (b) Despliegue de la arquitectura de la red de clasificación multiclase.



(a)



(b)

Figura VIII.- (a) Gráfica de “exactitud” y (b) gráfica de “pérdida” para los datos de entrenamiento y validación de la red de clasificación binaria.

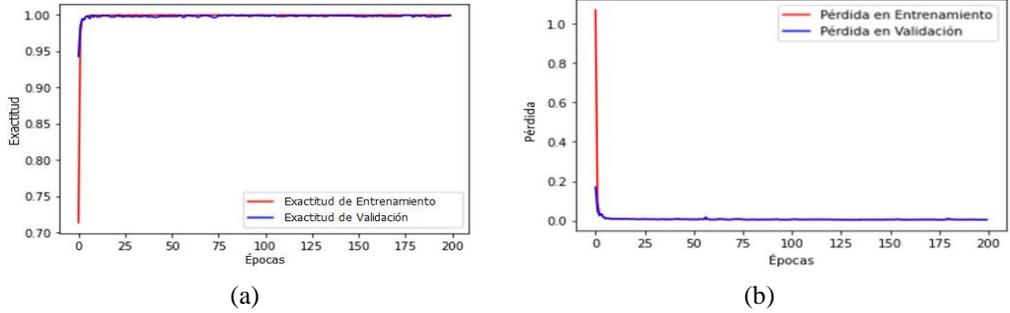


Figura IX.- (a) Gráfica de “exactitud” y (b) gráfica de “pérdida” para los datos de entrenamiento y validación de la red de clasificación multiclase.

		Valor real																												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
Valor predicho	1	71																											1	
	2		104																											2
	3			78				1										5					2							3
	4				46																									4
	5					37																								5
	6						30																							6
	7					8		26																				3		7
	8								31																					8
	9									36																				9
	10										33		1																	10
	11						3					78																		11
	12										2	46																		12
	13												31							1									1	13
	14													27									3							14
	15														29										3					15
	16					10										25														16
	17																29											1		17
	18																	46											2	18
	19									3		3								80	1									19
	20									5											50									20
	21																						30							21
	22														3									39						22
	23																								28	10				23
	24																									17				24
	25																										29			25
	26			1					2																			55		26
	27																												36	27

(a)

1	Alarma	10	Entrada	19	Peatones
2	Alto	11	Escolar	20	Prohibido
3	Autobus	12	Evacuación	21	Restaurante
4	Baños	13	Hombres	22	Reunión
5	Basura	14	Hospital	23	Taxi
6	Bicicleta	15	Información	24	Telefono
7	Cafeteria	16	Metro	25	Tienda
8	Discapacitados	17	Momunmento	26	Trolebus
9	Emergencia	18	Mujeres	27	Zona Segura

(b)

Figura X.- (a) Matriz de confusión de la red de clasificación multiclase. (b) Especificación de señalamiento para cada número de clase (de la 1 a la 27).

Como parte de la investigación, la base de datos utilizada para el entrenamiento y validación de las redes de clasificación binaria y de clasificación multiclase propuestas en este trabajo, también fueron implementadas en otras arquitecturas de redes neuronales convolucionales del estado del arte. Para la selección de dichas arquitecturas, una de las restricciones importantes fue la resolución mínima permitida de las imágenes de entrada, que, en nuestro caso, se tienen imágenes de  $64 \times 64$  píxeles. La Tabla V y la Tabla VI muestran parámetros de entrenamiento y desempeño de las redes NASNet [36], DenseNet [37] y ResNet [38], entrenadas para detectar la presencia o no de un señalamiento (clasificación binaria) y para la identificación del señalamiento (clasificación multiclase), respectivamente.

Arquitectura	Resolución de imágenes de entrada	Total de parámetros	Exactitud Entrenamiento	Pérdida Entrenamiento	Exactitud Validación	Pérdida Validación
NASNet Mobile	$64 \times 64$	4,271,830	49.17 %	69.37 %	59.78 %	69.31 %
DenseNet201	$64 \times 64$	18,325,826	49.69 %	69.40 %	58.26 %	69.50 %
ResNet50	$64 \times 64$	23,591,810	50.63 %	69.68 %	40.62 %	73.07 %
Red de clasificación binaria propuesta	$64 \times 64$	4,288,577	99.99 %	7.39 %	99.84 %	0.44 %

Tabla V.- Parámetros y desempeño de arquitecturas del estado del arte para la detección o no de señalamiento.

Arquitectura	Resolución de imágenes de entrada	Total de parámetros	Exactitud Entrenamiento	Pérdida Entrenamiento	Exactitud Validación	Pérdida Validación
NASNet Mobile	$64 \times 64$	4,298,255	99.91 %	0.18 %	99.68 %	0.8 %
DenseNet201	$64 \times 64$	18,373,851	99.91 %	0.16 %	99.92 %	0.34 %
ResNet50	$64 \times 64$	23,643,035	99.97 %	0.07 %	99.84 %	0.64 %
Red de clasificación multiclase propuesta	$64 \times 64$	2,227,803	99.95 %	0.46 %	99.84 %	0.44 %

Tabla VI.- Parámetros y desempeño de arquitecturas del estado del arte para la identificación del tipo de señalamiento.

Con respecto a los resultados obtenidos de las implementaciones en las arquitecturas de redes neuronales convolucionales del estado del arte para realizar una clasificación binaria, se observó un bajo desempeño en las tres arquitecturas seleccionadas, siendo contrastante con el desempeño de la red de clasificación binaria aquí presentada.

Sin embargo, las mismas arquitecturas adaptadas para una clasificación multiclase, 2 de ellas presentaron una exactitud menor a la reportada por la arquitectura aquí propuesta y una de ellas presentó mayor exactitud. Todas ellas con una exactitud arriba del 99 %, tanto para la etapa de

entrenamiento como de validación. Cabe resaltar que el número total de parámetros de la arquitectura propuesta es menor a los reportados en las arquitecturas del estado del arte, lo que podría significar una optimización en el uso de recursos para aplicaciones en sistemas embebidos.

**4.4. Implementación del sistema en el ordenador de placa reducida.**– El sistema se implementó en una tarjeta Raspberry Pi 3, que cuenta con una memoria externa microSD de 32 GB, en la cual se instaló el sistema operativo UBUNTU MATE 16.04.5. Dicha instalación se realizó a través del software Win32 DiskImager. La Tabla VII presenta las bibliotecas instaladas y sus versiones.

Librería	Versión	Biblioteca	Versión
Python 3	3.5.2	Numpy	1.16.2
Keras	2.2.2	Matplotlib	3.0.3
Skimage	0.14.0	Scipy	0.17.0
Open CV	3.2.0	Geopy	1.20.0
Tensorflow	1.8.0	SQLite	3.11.0

Tabla VII.- Librerías instaladas en la tarjeta Raspberry Pi 3.

**4.5. Pruebas al sistema.**– El sistema logró ser implementado en la tarjeta Raspberri Pi 3, sin embargo, el uso de recursos limita la velocidad de procesamiento, obteniéndose tiempos de entre 3-5 minutos para cada imagen, lo que a su vez limitó utilizar una cantidad de imágenes robusta para las pruebas al sistema, por lo que los resultados obtenidos no se presentan, al no ser representativos.

Con respecto al diseño de la carcasa del prototipo, se diseñó un sistema de sujeción ajustable a diferentes usuarios, quedando el prototipo a la altura del pecho de la persona. La Figura XI.a muestra la parte superior de la carcasa diseñada que incluye la palabra “arriba” en Braille, las Figuras XI.b y XI.c muestran el montaje del sistema sobre el usuario.

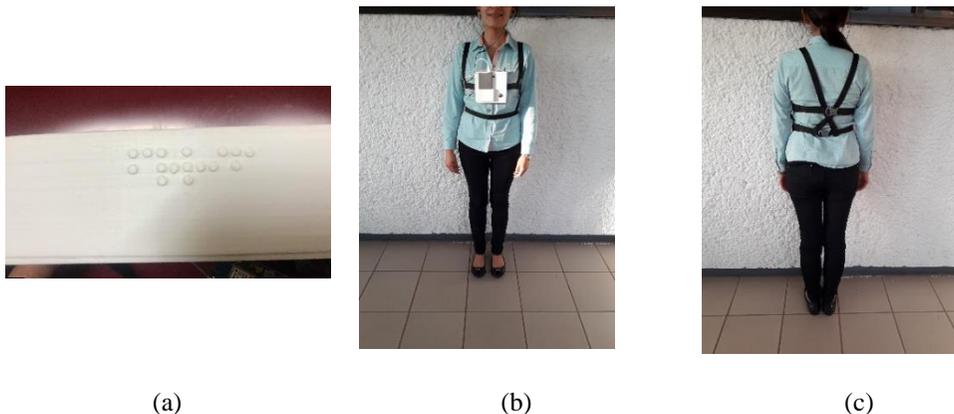


Figura XI.- Sistema de detección de señalamientos. (a) Vista superior de la carcasa, (b) Montaje frontal del sistema y (c) montaje posterior del sistema.

**6. Conclusiones.**— Tomando como base la optimización de recursos de hardware, se desarrolló e implementó un prototipo para la detección de señalamientos en entornos urbanos abiertos, para la asistencia a personas con discapacidad visual. Esta propuesta tenía el objetivo de desarrollar un prototipo de bajo costo, pero a su vez, que pudiera incluir técnicas recientes de visión artificial tales como las redes neuronales convolucionales, para lograr robustez en ambientes no controlados. Se propuso un sistema en cascada donde la imagen de entrada pasa por un bloque de segmentación para continuar con dos redes neuronales convolucionales, la primera, una red de clasificación binaria y la segunda, una red de clasificación multiclase.

Con respecto a la etapa de segmentación, una de las aportaciones de este trabajo es la utilización del algoritmo SLIC.

Cuando ingresa una imagen al prototipo, se realiza su segmentación y cada uno de esos segmentos es analizado por la red de clasificación binaria, para la detección o no de un señalamiento. El sistema fue diseñado para que, si la red de clasificación binaria al analizar cada segmento detecta en alguno de ellos un señalamiento, ya no continúe con la búsqueda de más señalamientos en otros segmentos. Eso limita al sistema a reconocer un solo señalamiento por imagen, pero esto podría ser modificado para localizar múltiples señalamientos en una misma imagen de entrada al sistema.

En el esquema actual (detección de un solo señalamiento por imagen), el tiempo de procesamiento de la red de clasificación binaria depende de la posición en que se encuentra el segmento con señalamiento dentro de la imagen original, si es de los primeros segmentos en ingresar, el tiempo de procesamiento en esta etapa durará menos. El peor escenario es una imagen donde no hay señalamiento o no lo reconozca, porque la red de clasificación binaria analizará todos los segmentos antes de pasar a la siguiente etapa. En caso de no reconocer algún segmento con señalamiento, la red de clasificación multiclase no se activa.

Se presentó el desempeño de las redes neuronales convolucionales desarrolladas. Para el caso de la red neuronal de clasificación binaria, se tienen datos de entrenamiento balanceados (número similar de datos por clase). Sin embargo, sería recomendable balancear la base de datos correspondiente a la red neuronal de clasificación multiclase. Aumentar la base de datos para mejorar la eficiencia de las redes neuronales, hacer un análisis con el uso de otras métricas de desempeño son tareas por realizar.

Se realizó una comparativa con otras arquitecturas de redes neuronales convolucionales del estado del arte, para el caso de la clasificación binaria, los valores de eficiencia arrojados por las redes del estado del arte son deficientes, lo que haría necesario un análisis más exhaustivo de ese comportamiento. Con respecto a la comparativa de la red de clasificación multiclase propuesta versus las arquitecturas del estado del arte seleccionadas, se observó exactitudes similares, siendo una ventaja para la arquitectura propuesta el número total de parámetros que utiliza.

Con respecto a la implementación del prototipo en el hardware seleccionado, a pesar de las limitaciones de la placa seleccionada, fue posible integrar todo el sistema, distribuyendo parte de las tareas del GPS en el Arduino, no obstante, la mayor parte de las funciones fueron realizadas por la Raspberry Pi, donde se procesaron las imágenes, se administró la base de datos (buscando señalamientos cercanos y actualizando los reconocidos) y se reprodujeron los mensajes de audio. Sin embargo, los tiempos obtenidos de procesamiento no corresponden a un sistema en tiempo real (se obtuvieron tiempos de procesamiento de 3-5 minutos, por lo que el sistema es inoperable. Una de las posibles opciones de mejora de hardware que no implica una sustitución de total es utilizar una tarjeta Raspberri Pi en unión con el dispositivo Movidius de Intel, que es una unidad de

procesamiento para visión (VPU) en formato USB que ofrece un acceso fácil a las capacidades de aprendizaje profundo de alto rendimiento y bajo consumo para aplicaciones IoT integradas. Lo que permitiría mejorar los tiempos de respuesta del sistema.

Con respecto al sistema de ubicación GPS, la selección y reproducción de audio, no se tuvieron dificultades, sin embargo, es importante analizar si la propuesta planteada de que el sistema puede acceder a señalamientos almacenados previamente de sitios donde ya estuvo el usuario es realmente útil, porque puede suceder que el señalamiento sea removido y las condiciones de ese entorno cambien, provocando un accidente al usuario.

Por último, será pertinente una evaluación de la forma en que se le haga llegar al usuario la información procesada por el prototipo, es decir, si puede adaptarse al uso de auriculares o manos libres, sin que se vea disminuido su sentido del oído.

## 7. Referencias.-

- [1] Organización Mundial de la Salud. "Temas de salud. Discapacidades". Available: <https://www.who.int/topics/disabilities/es/> [Accessed: 20- octubre- 2020].
- [2] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. "Estadísticas a propósito del día internacional de las personas con discapacidad (3 de diciembre). Datos nacionales". Comunicado de prensa núm. 638/19. 2-diciembre-2019.
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. "Clasificación de tipo de discapacidad-Histórica". Available: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/clasificadoresycatalogos/doc/clasificacion\\_de\\_tipo\\_de\\_discapacidad.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/clasificadoresycatalogos/doc/clasificacion_de_tipo_de_discapacidad.pdf) [Accessed: 20-octubre-2020].
- [4] E. A. Lafuente de Frutos, Educación inclusiva. Personas con discapacidad visual, 1º ed. Madrid: ITE, 2011, pp. 4-5.
- [5] Unión latinoamericana de ciegos. "La discapacidad visual y las tecnologías de la información y la comunicación". Available: <http://www.ulacdigital.org/wp-content/uploads/2020/01/La-Discapacidad-Visual-y-las-Tecnolog%C3%ADas-de-la-Informaci%C3%B3n-y-la-Comunicaci%C3%B3n-1-1.pdf> [Accessed: 20- octubre- 2020].
- [6] L. Nieto Riveiro y J. Muñoz Sevilla, "Aplicación de las tecnologías de la información y las comunicaciones en la vida diaria de las personas con discapacidad", 1º ed. A Coruña: Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións, 2012, pp. 303-304.
- [7] D. Gbenga, A. Shani , A. Adekunle. "Smart Walking Stick for Visually Impaired People Using Ultrasonic Sensors and Arduino". *International Journal of Engineering and Technology*, 9(5), 2017, pp. 3435–3447.
- [8] S. Mohapatra, S. Rout, V. Tripathi, T. Saxena and Y. Karuna, "Smart Walking Stick for Blind Integrated with SOS Navigation System," *2018 2<sup>nd</sup> International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, Tirunelveli, 2018, pp. 441-447
- [9] S. Wang and Y. Tian, Camera-Based Signage Detection and Recognition for Blind Persons, ICCHP (Computers Helping People with Special Needs), 2012.
- [10] Tian, Y., Yang, X., Yi, C. et al. "Toward a computer vision-based wayfinding aid for blind persons to access unfamiliar indoor environments". *Machine Vision and Applications* 24, pp. 521–535, 2013.
- [11] D. Kunene y H. Vadapalli, "Indoor Sign Recognition for the Blind", SAICSIT (Annual Conference of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists), Johannesburgo, Sudáfrica, 2016.
- [12] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, Deep Learning. MIT Press, 2016. [www.deeplearningbook.org](http://www.deeplearningbook.org)
- [13] F. Chollet. Deep Learning with Python. Manning Publication Co, 2017.
- [14] M. Afif, R. ayachi, Y. Said, E. Pissaloux and M. Atri, "Recognizing signs and doors for Indoor Wayfinding for Blind and Visually Impaired Persons", *2020 5<sup>th</sup> International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, Sousse, Tunisia, 2020, pp. 1-4.
- [15] F. Zanetti, "Convolutional Networks for Traffic Sign Classification". Tesis de Maestría. Department of Signal and Systems. Chalmers University of Technology, Göteborg, Suecia. Pp. 26, 2016.

- [16] Madan, Rishabh, Deepank Agrawal, S. Kowshik, Harsh Maheshwari, S. Agarwal and D. Chakravarty. "Traffic Sign Classification using Hybrid HOG-SURF Features and Convolutional Neural Networks." *ICPRAM*, 2019.
- [17] Saleh, Shadi & Saleh, Hadi & Nazari, Mohammad & Hardt, Wolfram, "Outdoor Navigation for Visually Impaired based on Deep Learning". *Actual Problems of System and Software Engineering (APSSE 2019)*, 2019.
- [18] Comité Internacional Pro Ciegos I. A. P., CDMX. Available: <http://lugaresaccesibles.com/lugar/comite-internacional-pro-ciegos-iap-cdmx>. [Accessed: 15-octubre-2020].
- [19] Información oficial del Gobierno de los Estados Unidos relativa al Sistema de Posicionamiento Global y temas afines. Sistema de posicionamiento global al servicio del mundo. Available: <https://www.gps.gov/spanish.php> [Accessed: 15-octubre-2020].
- [20] A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. Hinton, "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks". *Neural Information Processing Systems*. 25. 10, 2012.
- [21] K.Symonian, A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition", 2015.
- [22] Vezhnevets, Konouchine , "GrowCut" - Interactive Multi-Label N-D Image Segmentation By Cellular Automata, 2005.
- [23] N. Dalal, B. Triggs, "Histograms of oriented gradients for human detection". In *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on, volume 1, pages 886– 893. IEEE.
- [24] H. Bay, T. Tuytelaars, L.Van Gool, "Surf: Speeded up robust features". In Leonardis, A., Bischof, H., and Pinz, A., editors, *Computer Vision – ECCV 2006*, pages 404–417, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [25] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, *Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad*, México, 2014, pp. 9.
- [26] M. Hart, "TinyGPS++ | Arduiniana", *Arduiniana.org*, 2014. [Online]. Available: <http://arduiniana.org/libraries/tinygpsplus/>. [Accessed: 19- mayo- 2019].
- [27] Stutz D., Hermans A., Leibe B. (2017). *Superpixels: An Evaluation of the State-of-the-Art*. *Computer Vision and Image Understanding*. doi: 10.1016/j.cviu.2017.03.007.
- [28] Achanta R., Shaji A., Smith K., Lucchi, A., Fua, P., Susstrunk. S. (2012). *SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34 (11): 2274–2281.
- [29] Ren X., Malik J. (2003). *Learning a classification model for segmentation*. *International Conference on Computer Vision*. Vol. 1: 10–17.
- [30] Achanta R., Shaji A., Smith K., Lucchi A., Fua P., Susstrunk S. (2010). *SLIC Superpixels*. EPFL Technical Report 149300
- [31] A. Hernández, Y. González, A. Morales (2017). Implementación de algoritmo de superpíxeles para la segmentación de imágenes a color. *Boletín UPIITA No. 61*. Available: <http://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/component/content/article/9-articles/23-numeros-antiores-cyt> [Accessed: 27- junio- 2020].
- [32] Conversor texto-voz, Octubre 3, 2017, Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Conversor-texto-voz>.
- [33] Layer weight initializers. Usage of initializers. Available: <https://keras.io/api/layers/initializers/> [Accessed: 25-octubre-2020].

- [34] Evaluación de modelos de clasificación: Matriz de confusión y curva ROC. <http://ericmelillanca.cl/content/evaluaci-n-modelos-clasificaci-n-matriz-confusi-n-y-curva-roc> [Accesed: 20-octubr-2020].
- [35] T. Fawcett, "An introduction to ROC analysis". *Pattern Recognition Letters*, 27, 861-874, 2006.
- [36] B. Zoph, V. Vasudevan, J. Shlens and Q. V. Le, "Learning Transferable Architectures for Scalable Image Recognition," *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Salt Lake City, UT, 2018, pp. 8697-8710, doi: 10.1109/CVPR.2018.00907.
- [37] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten and K. Q. Weinberger, "Densely Connected Convolutional Networks," *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, HI, 2017, pp. 2261-2269, doi: 10.1109/CVPR.2017.243.
- [38] K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun, "Deep Residual Learning for Image Recognition," *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, 2016, pp. 770-778, doi: 10.1109/CVPR.2016.90.

# 4BeGreen: Metodología para motivar la conciencia ambiental, la valorización y prevención de residuos en empresas de servicios

*4BeGreen: A methodology to encourage environmental awareness for recovery, and prevention of waste in service companies*

---

Luis Eduardo Cañón-Ramírez<sup>1</sup>, Vanessa Prieto-Sandoval<sup>2</sup>

Recibido: Agosto 2020

Aceptado: Diciembre 2020

---

**Resumen.-** La operación de una organización de servicios puede crear el imaginario de una reducida generación de impactos ambientales negativos, esto se evidencia en la ausencia de estrategias de gestión ambiental al interior de la empresa tanto en su operación como en los hábitos de sus empleados. Sin embargo, este es un tema que cobra cada vez más importancia en las organizaciones por los beneficios para la empresa y sus empleados. La empresa se beneficia en términos de recordación de marca, prestigio, beneficios económicos y legales. De la misma manera, los colaboradores pueden sentir mayor sentido de pertenencia, lealtad hacia la empresa e incrementar su sentido de retribución al sentir que actúan de manera ética. Con el objetivo de proponer una metodología para motivar la conciencia ambiental, la valorización y prevención de residuos en empresas de servicios, este estudio desarrolló un caso de estudio en una empresa de servicios de exportación y negociación internacional. Como resultado se diseñó la metodología 4BeGreen, compuesta por 4 pasos concretos: 1) Diagnóstico, 2) Caracterización de residuos, 3) Plan de concientización teórica y práctica, 4) Evaluación ecológica y retroalimentación.

**Palabras clave:** Valorización de residuos, Economía circular, sostenibilidad, gestión ambiental, empresas de servicios.

**Summary.-** *The operation of a service organization can create an image of a reduced generation of adverse environmental impacts. It is evidenced by the absence of environmental management strategies within the company both in its operation and in the habits of its employees. However, it is an increasingly important topic in organizations based on the benefits for the company and its employees—the company benefits in terms of brand awareness, prestige, economic benefits, and legal interests. In the same way, employees can feel a greater sense of belonging, loyalty to the company, and increase their sense of retribution by feeling that they are ethical. Intending to propose a methodology to motivate environmental awareness, recovery, and prevention of waste in service companies, this study developed a case study in an export service company. As a result, the 4BeGreen methodology was designed, consisting of 4 concrete steps, representing benefits for the company and its collaborators. 1) Diagnosis, 2) Waste characterization, 3) Theoretical and practical awareness plan, 4) Ecological evaluation and feedback.*

**Keywords:** *Waste recovery, circular economy, sustainability, environmental management, service companies.*

---

<sup>1</sup> Depto. de Sostenibilidad, Procolombia, lcanon@procolombia.co, ORCID iD: 0000-0002-9852-1554

<sup>2</sup> Depto. de Administración, Pontificia Universidad Javeriana, juliethv.prieto@javeriana.edu.co, ORCID iD: 0000-0001-9937-7710

**Introducción.-** El desarrollo sostenible es un compromiso global, que ha cobrado especial importancia desde el año 2015, con la firma del COP21 en París donde se estableció el compromiso de limitar el aumento de la temperatura media global por debajo de los 2°C, la publicación del *Laudato Sí*, y el mandato otorgado por las naciones unidas al Pacto Global para sensibilizar a las organizaciones privadas y comprometerles para contribuir al cumplimiento de la nueva agenda para el desarrollo establecida en los Objetivos de Desarrollo Sostenible a 2030 [1]. En el marco de los desafíos ambientales y sociales de esta época, la Economía Circular (EC) se presenta como un modelo económico alternativo que facilita el desarrollo sostenible, impulsa la innovación para el cierre de flujos de materiales y energía, y tiene un alcance multinivel, donde países, agrupaciones industriales y empresas pueden generar estrategias para su implementación [2].

La implementación en las empresas usualmente se relaciona con prácticas de producción más limpia para mejorar los procesos y prácticas de la empresa [3], las estrategias de diseño sostenible para bienes y servicios [4-6], logística inversa que facilita la recuperación de los bienes después de su uso para seleccionar la opción de disposición final más efectiva o recuperación de los materiales a través de modelos de negocio relacionados con la remanufactura, restauración, reutilización o reciclaje [7-8], programas de capacitación ambiental y técnica para la fuerza laboral [9-10].

En este sentido, desde el sector privado, las empresas están llamadas a generar estrategias que permitan concienciar a sus empleados sobre la importancia de la sostenibilidad ambiental y los beneficios que puede traer para la prosperidad social y económica del negocio. Son varias las metodologías para mejorar el conocimiento, la conciencia y la preocupación por el ambiente en las empresas. Según Ormazabal *et al.* [11] las certificaciones de gestión ambiental son útiles para mostrar la estandarización de la gestión ambiental en una organización con madurez intermedia. La razón es que las normas proporcionan especificaciones y directrices nacionales e internacionales para los sistemas de gestión ambiental [12]. En este sentido, los productos y servicios de las empresas también pueden certificarse, un ejemplo es el ecoetiquetado, que es la manifestación visible de un proceso voluntario de eco-innovación. En este proceso, se cumplen las expectativas ambientales de los consumidores, las empresas aumentan su valor creado y capturado y mejoran su sostenibilidad, y los gobiernos e instituciones fomentan la producción y el consumo más limpios [13]. Las etiquetas ecológicas simplifican el proceso de toma de decisiones de los consumidores, y esto indica que están eligiendo un bien o servicio "verde" [14].

Por otra parte, la gestión ambiental de las empresas también requiere la caracterización y apropiada gestión de residuos que pueden ser generados en el proceso productivo o en el posconsumo. Según Smith, R. [15] la gestión adecuada de los residuos sólidos y el reciclaje disminuye la cantidad de materia prima virgen usada en procesos productivos de bienes y servicios, ya que, al ingresar de nuevo los materiales recuperados a las cadenas de valor, son transformados para darle vida a otros productos. "Hacia 1990 países como Dinamarca y Alemania intensificaron los programas de reciclaje, logrando reducir hasta un 90% de materia prima virgen", lo que evidencia que una gestión adecuada de residuos no solamente disminuye el impacto ambiental negativo generado en los vertederos, sino que se convierte a su vez en una oportunidad de generación de ingreso y disminución en costos de producción para las organizaciones.

Sin embargo, se evidencia un vacío en la literatura relacionado con la ausencia de una metodología que cumpla con la función de crear conciencia y conocimiento en los empleados; y a la vez mejorar la gestión ambiental reduciendo y valorizando los residuos de las empresas, y así contribuir con a la implementación de la economía circular. Una búsqueda usando la ecuación TEMA: ("circular economy") AND TEMA: (employee\*) en la base de datos Web of Science hecha en Julio de 2020, mostró únicamente 36 resultados. Luego la ecuación TEMA: ("environmental management") AND

TEMA: (employee\*) mostró 461 publicaciones, pero solo 55 pertenecen a Latinoamérica (ninguna en Colombia), y más del 80% fueron publicadas en los últimos 10 años. Una tercera ecuación de búsqueda con “Training” AND “Environmental awareness”, generó 835 resultados, de los cuales solo 50 son de Latinoamérica y 111 son del año 2020. Por otra parte, este artículo se centra en las empresas de servicios ya que estas presentan un especial desafío porque sus operaciones no generan residuos directamente relacionados con actividades manufactureras, sino que están relacionados con actividades de backoffice, así como los hábitos de consumo de quienes allí trabajan. Es importante resaltar que gran parte de los procesos, modelos o metodologías de gestión ambiental se enfocan en empresas de manufactura debido a la generación directa de un alto volumen de residuos, y no atienden las oportunidades de implementación de la economía circular en empresas de servicios.

Por tanto, el objetivo principal de este artículo es diseñar una metodología para motivar la conciencia ambiental, la valorización y prevención de residuos en empresas de servicios. Luego como segundo objetivo, este estudio valida la efectividad de la metodología con un caso demostrativo, mostrando los sus beneficios, ambientales, sociales y económicos.

Después de esta introducción, la sección 1 presenta los fundamentos teóricos, la sección 2 explica la metodología utilizada en este estudio. En la sección 3 se presenta la propuesta metodológica, los resultados del caso de estudio y su contribución. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones y se identifican las áreas de investigación futura.

## **2. Revisión de la literatura.-**

**2.1. Implementar la Economía Circular con los empleados.-** La gestión ambiental en las organizaciones "implica el estudio de todas las actividades técnicas y organizativas destinadas a reducir el impacto ambiental causado por las operaciones comerciales de una empresa" [16]. Pero la gestión ambiental de las empresas se encuentra en diferentes etapas de madurez [11]. Significa que el comportamiento de las empresas y la forma en que enfrentan los desafíos ambientales están más o menos avanzadas en cada empresa [17].

En la misma línea de actuación, La ONU HABITAT [18] se ha encargado de promover la iniciativa global denominada Waste Wise Cities , cuyo objetivo es promover ciudades inteligentes en el manejo de los residuos a través de cinco acciones básicas, “Repensar, Rechazar, Reducir, Reutilizar y Reciclar”. Esta campaña se convierte en una gran oportunidad para que las organizaciones promuevan practicas encaminadas a la implementación de las cinco acciones básicas mencionadas anteriormente y que a su vez contribuyen al cumplimiento de los ODS orientados a mitigar los impactos ambientales negativos que genere la operación de una organización

Aun así, el alto grado de madurez de la gestión y el conocimiento ambientales de una compañía, no siempre garantizan que este conocimiento sea compartido por todos los empleados. Considerando que las empresas son compuestas por personas con ideas, cultura y motivaciones[19-21], la gestión del talento humano es uno de los temas más relevantes para la implementación de la EC [22]. La teoría y la práctica indican que todos los empleados deben ser considerados como gerentes ambientales y empoderarlos con la posibilidad de mejorar el desempeño de las empresas en este aspecto [23], a través de conocimiento ambiental, conciencia y preocupación para implementar prácticas ecológicas [24].

Sin embargo, no todas las compañías están desarrollando programa para crear conciencia y el compromiso de los empleados para promover prácticas empresariales en el marco de la economía

circular y de "cero residuo"[22]. Incluso, empresas como Biogen, con estrategias de "cero residuos" han identificado que una conciencia limitada sobre la separación y eliminación de los desechos de la cocina y la oficina. 43% de los empleados encuestados informaron que la señalización para separar los desechos del reciclaje y el compostaje no era clara, resultado que tenía impacto directo en la eliminación inadecuada de materiales reciclables en contenedores de desechos sólidos (en particular, cartón y utensilios de cocina compostables).

Así que, tal como lo explican Veleva *et al.* [22] se requieren metodologías y herramientas que para involucrar a los empleados en la implementación de la economía circular en las empresas, así como la medición eficaz de la sensibilización y el avance de la reducción, reutilización y remanufactura de bienes. Por lo cual, Veleva *et al.* [22] propone la promoción de "cero residuo" y Economía Circular, con el modelo "Expanded zero waste practice" donde proponen usar la jerarquía de reducción de desechos de reducir-reutilizar-reciclar y compostar-recuperación energética-disposición final, y a la vez incorpora dos dimensiones. Primero, el diseño de indicadores para medir los "resultados" e "impactos" de cada estrategia de reducción de residuos y en segundo lugar el "desperdicio cero" como parte integral de una estrategia de participación de los empleados en la que los empleados están informados, educados y capacitados para tomar medidas.

**2.2. Empresas de servicios.-** Según la Organización Mundial del Comercio el sector de los servicios representa el mayor porcentaje de la economía mundial (65%) y genera el 49% de los empleos, en Latinoamérica y el caribe tiene un peso del 61% en el PIB y genera el 65% de los empleos aproximadamente [25]. Además, el comercio de servicios tiene un gran potencial para contribuir a la optimización de recursos, generar economías de escala, diversificar la oferta, e impulsar la productividad[25]. En este sentido, la innovación y el desarrollo de mejores prácticas de gestión ambiental puede tener un impacto en más de la mitad de las empresas y trabajadores en el mundo.

Sin embargo, solo en España el sector servicios genera un total de 5.698.000 toneladas de residuos al año y el 60% de estos provienen del comercio, así como el 34,5% de los plásticos que se generan en España provienen del sector servicios[26]. Así, se puede decir que las empresas de servicios tienen la responsabilidad de implementar estrategias que permitan mitigar su impacto ambiental. Para ello pueden implementar técnicas de reciclaje, entendido como "aprovechamiento total o parcial de los residuos industriales para su reutilización en el propio proceso".[27] Ya que, sin importar su objeto social estas generan residuos que deben ser tratados adecuadamente para impedir su llegada a los vertederos.

**3. Metodología.-** Para este estudio se hizo una revisión de literatura para el desarrollo del estado del arte y diseño de la metodología. Luego, se desarrolló un caso de estudio para validar su efectividad en una empresa de servicios de exportación y lobby de comercio internacional que para este estudio se llamará CoExport.

La revisión de literatura se enfocó en identificar modelos y estrategias para implementar la Economía Circular con ayuda de los empleados en literatura académica y literatura gris. Las ecuaciones de búsqueda que se utilizaron fueron TEMA: ("Economía Circular") AND TEMA: (empresas), TEMA: ("circular economy") AND TEMA: (employee engagement), así como TEMA: ("economía circular") AND TEMA: (sector servicios) en Julio de 2020, en la base de la Pontificia Universidad Javeriana que incluye colecciones como Fuente Académica Premier, Complementary Index, eBook Collection (EBSCOhost), eBook Academic Collection, entre otras.

Los casos de estudio exploran y estudian fenómenos de la vida real a través del análisis contextual

detallado de un número limitado de eventos o condiciones y sus relaciones [28]. En este sentido, el caso de estudio se centró en la importancia de transformar las políticas de gestión de residuos de los países y las ciudades en acciones concretas que permita generar alternativas sostenibles [29] en las empresas de servicios y de esta manera definir planes de educación ambiental que impacten a las comunidades en general. Es por esta razón que, este estudio plantea una serie de pasos para que se concreten acciones reales que promuevan hábitos sostenibles en los colaboradores de esta organización que se reflejen en su trabajo con resultados medibles.

**3.1. Contexto.-** Este estudio se desarrolló en la empresa que para el estudio fue nombrada CoExport, fundada en 1992 en Colombia, con 490 de empleados, y presente en 9 departamentos y 25 países. La empresa contaba con un modelo de sostenibilidad integral, en el cual se definían parámetros y estrategias encaminadas a la sostenibilidad ambiental en la gestión interna. Este modelo se alinea con la evolución del país, ya que Colombia ha iniciado su transición hacia la economía circular tras casi tres décadas de reestructuración legal en el sector de residuos [30].

**3.2. Desarrollo del caso.-** El caso se llevó a cabo del 13/08/2019 a 30/03/2020 en las oficinas de Bogotá, Colombia, con la participación de 200 empleados, ubicados en 4 pisos de un edificio de más de 40 pisos. De acuerdo con Sanchez-Muñoz et al. [31], cerca del 80% de la población bogotana reconoce en gran medida la importancia del reciclaje, sin embargo, muy pocos no conocen los conceptos básicos, los procesos de separación adecuadas y los objetivos de la separación de residuos. Por lo que se hace necesaria que las organizaciones como CO-EXPORT implementen iniciativas que promuevan la gestión adecuada de residuos sólidos, que a su vez promuevan el reciclaje, la reutilización, la reducción, el rechazo y el repensar los hábitos de consumo.

Con el diseño e implementación de la metodología se espera que haya un aumento del material reciclado (cantidad mensual de material entregado al operador de reciclaje), aumento en la participación de los colaboradores (fotografías, listas de asistencias a las actividades, número de participantes), disminución en el consumo del agua (medición recibos públicos), y disminución en el uso de plásticos de uno solo uso y polietileno expandido.

**4. Resultados y discusión.-** En esta sección se presenta la propuesta metodológica de 4BeGreen, explicando cada uno de los pasos clave.

**4.1. Propuesta metodológica 4BeGreen.-** Con base en la revisión de literatura se identificó que la metodología del *Jaca et al.* [32] y el programa, La ONU HABITAT [18] proporcionaba un paso a paso y estrategias clave para incrementar la conciencia y el comportamiento sostenible de los empleados, respectivamente. *Jaca et al.* [32] plantea la importancia de desarrollar elementos de diagnóstico, un plan de acción, ejecución y evaluación para implementar la economía circular en las empresas. Así se diseñó la metodología 4BeGreen, con cuatro pasos clave: 1) Diagnóstico, 2) Caracterización de residuos, 3) Plan de concientización teórica y práctica, 4) Evaluación ecológica y retroalimentación ilustrada en la figura I.

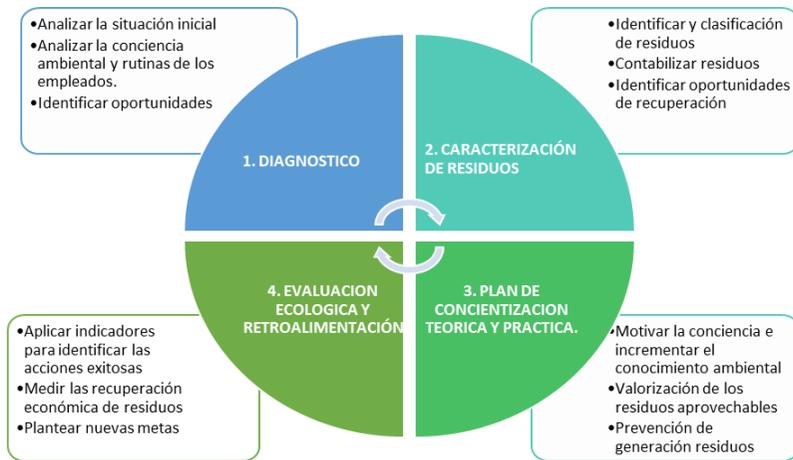


Figura I.- Metodología 4BeGreen.

**4.2. Diagnóstico.-** En esta primera fase, el diagnóstico tiene el propósito de analizar la situación actual de las prácticas ambientales de la organización, así como la conciencia ambiental y rutinas de los empleados. Para este propósito se aplicó la herramienta “Journey map” presentado en la figura II. Un “journey map” es una herramienta de clarificación, para comprender la experiencia de los usuarios a través de la identificación cronológica de las actividades clave que realizan los usuarios. Se hace revisando la lista completa de actividades desarrolladas por los usuarios o en este caso el “staff”, luego se realiza un análisis de cluster de las principales actividades, las cuales se pueden mostrar como nodos en una línea de tiempo[33]. A través de recorridos de observación que permitieron identificar las condiciones de los puntos ecológicos, la separación de residuos y el comportamiento de los colaboradores durante la separación en los puntos ubicados en los cuatro pisos de la organización. Dichos recorridos se realizaron de la siguiente manera: el primer día se realizó el recorrido antes del mediodía del martes, el segundo día se realizó después de las 14 horas del miércoles. Esta observación se realizó de forma indirecta ya que los individuos no sabían que su actuar estaba siendo observado, estos comportamientos fueron consignados en una hoja de registro diseñada para tal fin. Después de eso, se identifican acciones positivas y negativas. Finalmente, la tarea más importante es identificar conocimiento nuevo acerca de los desafíos y oportunidades de innovación en la rutina analizada o un proceso.

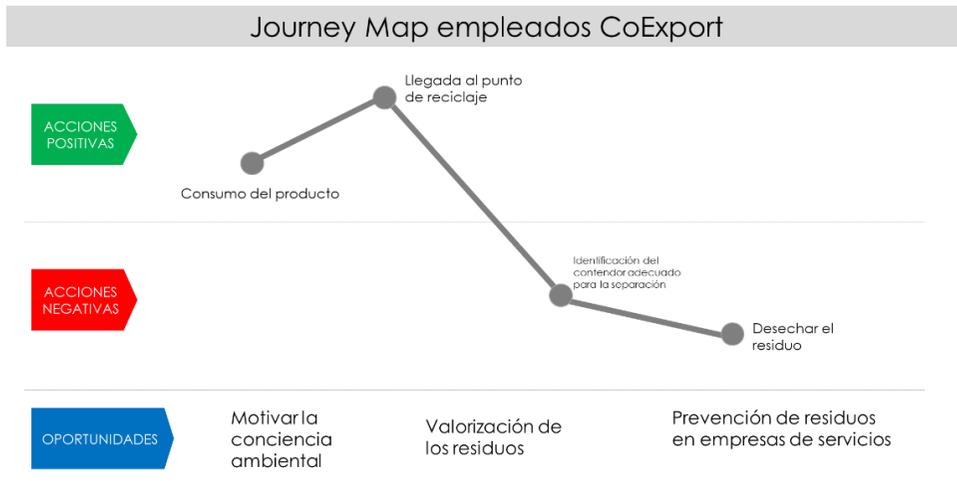


Figura II.- Journey Map empleados CoExport.

Estos recorridos permitieron dar cuenta de la deficiencia general de las prácticas ambientales y sobre todo de la falta de información y orientación frente a la disposición final de los residuos ya que se evidenciaron rutinas en el comportamiento de los colaboradores, en cuatro elementos: personales, contextuales, sociales y organizacionales. Primero, en cuanto a los elementos personales, son los que tienden a requerirse con inmediatez en rutinas rápidas de uso, y hay alto desconocimiento del impacto a futuro. Segundo, los elementos contextuales, durante la observación se evidenció que los empleados prestaban poca atención a los colores de demarcación de las canecas de disposición de residuos y el comportamiento es mimético, así que las personas tienen a usar la caneca que usan sus compañeros sin criterios ambientales. Luego, los elementos sociales se refieren a la baja conciencia ambiental que es ocasionada por la falta de sanciones y divulgación adecuada de programas distritales o nacionales de reciclaje y/o separación de residuos y economía circular. Finalmente, los elementos organizacionales consisten en las normas ambientales de la empresa, pero no había una “sanción organizacional” por el uso inadecuado de las canecas ni incentivos apropiados para motivar la apropiada separación de residuos.

**4.3. Caracterización de residuos.-** En esta segunda fase, durante 4 días (lunes a jueves) se llevó a cabo la caracterización de los residuos mediante el formato de “Caracterización de residuos sólidos” (Figura III) de CoExport que establece el tipo de residuos, cantidad y peso, con el objetivo de identificar los tipos de residuos que se estaban generando. Para lo anterior, se realizó un proceso de clasificación, conteo y pesaje de los residuos depositados en los 8 puntos ecológicos de la organización, ubicados en los 4 pisos (2 en cada piso) entre las 14 y las 16 horas, para tener los residuos acumulados en el día.

Como resultados de esta caracterización se obtuvieron 29.5 kg de residuos orgánicos, 2.5 kg de residuos de papel, otros residuos aprovechables como 21 botellas de vidrio, 20 latas de aluminio, 7 cajas Tetrapak, 114 botellas PET. El resto eran materiales no aprovechables contaminados con alimentos (Figura IV).

PROCESO CARACTERIZACION RESIDUOS OFICINAS CO-EXPORT																	
FECHA DEL ESTUDIO	RESPONSABLE EQUIPO REALIZA LA CARACTERIZACION							HORARIO RECOLECCION									
TIPO DE RESIDUO	DIA 1		DIA 2		DIA 3		DIA 4										TOTAL
	PISO 1	PISO 35	PISO 1	PISO 7	PISO 36	PISO 35	PISO 1	PISO 7	PISO 36	PISO 35	PISO 1	PISO 7	PISO 36	PISO 35	PISO 1	PISO 7	
PAPEL																	
BOLSAS DE PAPEL																	
CARTON																	
ORGANICOS																	
ICOPOR																	
VIDRIO																	
PET																	
TETRAPAK																	
PAQUETES PAPAS																	
BOLSAS PLASTICAS																	
VASOS PLASTICOS																	
CONTENEDORES PLASTICOS																	
CUBIERTOS PLASTICOS																	
LATAS																	
MEZCLADORES																	
TOTAL																	

Figura III.- Caracterización de residuos sólidos 4BeGreen.



Figura IV.- Caracterización de residuos, hecha entre el 13 y 16 de agosto de 2019.

**4.4. Plan de concientización teórica y práctica.-** Una vez identificados los residuos generados, los hábitos de consumo y posconsumo, se estableció un plan de concientización teórico-práctico que permitiría generar estrategias para concienciar a los colaboradores sobre la importancia de la sostenibilidad ambiental y los beneficios que pueden traer. Así mismo, la concientización tiene el propósito de fortalecer las practicas del BackOffice, bajo una campaña sombrilla que reuniría todas las actividades propuestas, para efectos de este articulo la campaña de llamará VIVIENDO EL AMBIENTE.

En esta fase de establecieron actividades dirigidas a tres propósitos; 1) motivar la conciencia e incrementar el conocimiento ambiental, 2) la valorización de los residuos aprovechables y 3) prevención de generación residuos, como lo muestra la figura V. Primero, la conciencia y el conocimiento se incrementaron con concurso que premia el comportamiento, hábitos y consumo responsable, así como la adecuada separación de residuos. En este sentido, también se promovieron

jornadas de voluntariado para siembra de árboles, limpieza y recuperación de parques y zonas verdes. En segundo lugar, la valorización de residuos se desarrolló a través de un programa externo de economía circular que transforma residuos plásticos en madera plástica. También se coordinó y ejecutó la venta de material reciclado a gestor ambiental, el dinero obtenido se reinvertió en actividades con comunidades vulnerables o en riesgo de exclusión. Finalmente, la prevención de generación de residuos se ha logrado con jornadas de sensibilización con operadores de reciclaje y recuperadores ambientales para entender la adecuada separación de residuos en la fuente. Además, se han diseñado programas para la sensibilización frente al consumo y eliminación de plástico de un solo uso.



Figura V.- Concientización ambiental teórico-práctica.

**4.5. Evaluación ecológica y económica de resultados.-** Durante la implementación de la estrategia se han logrado avances significativos en las prácticas de gestión ambiental, que además han contribuido a la implementación de la economía circular al interior de la organización.

Frente al impacto ecológico, ha aumentado la recolección del material no contaminado y que puede ser recuperado y entregado al gestor ambiental de residuos. En el periodo comprendido entre agosto y diciembre del año 2019 se lograron entregar 2316 kg relativos de material al gestor ambiental de residuos, mientras que en el mismo periodo del año inmediatamente anterior se entregaron 650 kg, representando un aumento cercano al 350% (figura VII). La principal causa del incremento es que en el año 2018 había una población y consumo similar en la empresa, pero los materiales no eran separados adecuadamente, así que también sufrían contaminación cruzada que imposibilita su fácil recuperación.

Adicionalmente, se ha hecho la compensación del impacto ambiental negativo mediante programas voluntarios de siembra de árboles, así que en el último periodo de han sembrado 35 árboles. Como parte de esta estrategia, la venta de este material permite financiar iniciativas sociales con comunidades vulnerables o en riesgo de exclusión; en el periodo comprendido de agosto a diciembre del año 2019 se lograron recaudar cerca de 300 USD, mientras que en el mismo periodo del año inmediatamente anterior se recaudaron 57 USD aproximadamente (figura VI).

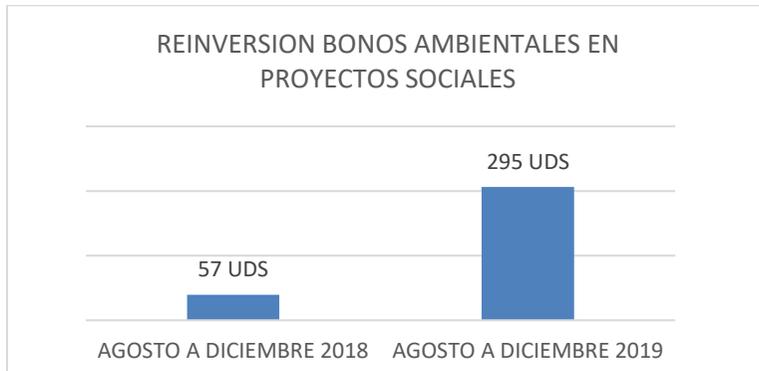


Figura VI.- Incremento de la Reinversión de beneficios económicos del material reciclado.

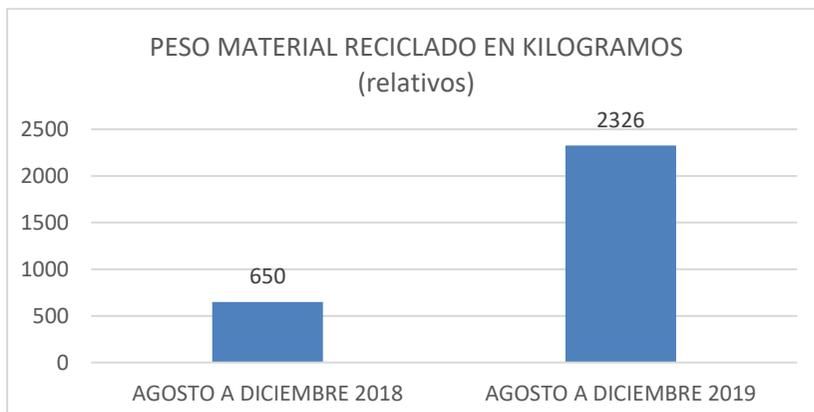


Figura VII.- Incremento del Material reciclado.

**5. Conclusiones.-** El principal objetivo del estudio fue logrado a través de la metodología 4BeGreen, basada en cuatro pasos: 1) Diagnóstico, 2) Caracterización de residuos, 3) Plan de concientización teórica y práctica, 4) Evaluación ecológica y retroalimentación. El diagnóstico está dedicado a entender la situación inicial de la gestión ambiental en la empresa, y el comportamiento de los empleados con herramientas como el “Journey map” para identificar oportunidades de recuperación de materiales, entrenamiento y sensibilización de los empleados. Luego, la caracterización de residuos consiste en identificar los residuos generados en la empresa por actividades de la operación o de backoffice y con esta actividad también se puede conocer en detalle los errores de separación en los espacios de disposición final de las oficinas. Con la información recopilada, se diseña el plan de concientización teórica y práctica 1) motivar la conciencia e incrementar el conocimiento ambiental, 2) la valorización de los residuos aprovechables y 3) prevención de generación residuos. Finalmente, se ejecuta la evaluación ecológica y retroalimentación para identificar los logros en la separación y valorización de los recursos, así como los desafíos de cara a la transición hacia un sistema circular.

El segundo objetivo del estudio se desarrolló con éxito, ya que se validó la efectividad de la metodología a través de un caso de estudio en una empresa de servicios de exportación y lobby de comercio internacional, ubicada en Colombia. La aplicación de la metodología muestra que la

capacitación de los empleados y el incremento de su conciencia ambiental permitió la recuperación de 2326kg relativos de material reciclable, cuyo beneficio económico valorado en 295 USD se invirtió en proyectos sociales y ambientales. Este resultado prueba que las prácticas ambientales generan ahorros económicos y permiten la reformulación de inversiones. Además, los empleados de la organización se han involucrado en nuevos programas de concienciación ambiental y voluntariado que permiten cumplir con los objetivos de sostenibilidad ambiental y social de la organización. En estas actividades se ha contado con la participación de más de 150 colaboradores, quienes han demostrado la implementación de prácticas de consumo sostenible y especialmente en la adecuada separación de residuos.

A nivel práctico se espera que en el largo plazo los empleados de la organización autogestionen el programa para mantener y mejorar la correcta separación de residuos, el uso de los puntos ecológicos, la eliminación de canecas personales, la creación de nuevos hábitos, concientización sobre consumo diario, incluso en los hogares. Así mismo, el sentido de retribución de los colaboradores los ha hecho sentir más a gusto en su trabajo, empatía, y satisfacción.

Sin embargo, aún permanecen barreras como la disponibilidad de tiempo para participar en las actividades de aprendizaje y gestión, una minoría de los colaboradores aun no muestra interés en el proceso, el proyecto ha sido o cuenta con un presupuesto propio y la pandemia del COVID19 ha interrumpido algunas de las actividades de concientización en las instalaciones de la organización lo cual impide la trazabilidad de los residuos de los colaboradores que trabajan desde sus hogares.

Finalmente, el estudio cuenta con algunas limitaciones. La primera de ellas es que la metodología 4BeGreen está especialmente diseñada para disminuir los residuos que generan los empleados directamente, mientras que residuos como los eléctricos o electrónicos no han sido incluido. En estudios futuros hay una gran oportunidad para identificar estrategias que permitan ampliar el tipo de materiales que se pueden recuperar en empresas de servicios.

**6. Agradecimientos.-** Esta investigación es fruto del apoyo del “Programa ViVerde – Vive La Sostenibilidad” y proyecto “Desafíos y Oportunidades de la Implementación de la Economía Circular en las Empresas” ID00009299 de la Pontificia Universidad Javeriana.

## 7. Referencias.-

- [1] UN Global Compact, “La misión del Pacto Mundial: 10 Principios + 17 ODS,” *Pacto Mundial ONU*, 2017. [Online]. Available: <http://www.pactomundial.org/2017/03/10-principios-17-ods/>. [Accessed: 10-Aug-2020].
- [2] Prieto-Sandoval, V. *et al.*, “Towards a consensus on the circular economy,” *J. Clean. Prod.*, vol. 179, no. April, pp. 605–615, 2018.
- [3] Park, J. *et al.*, “Creating integrated business and environmental value within the context of China’s circular economy and ecological modernization,” *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 15, pp. 1492–1499, Oct. 2010.
- [4] Prieto-Sandoval, V. *et al.*, “Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación [Circular economy: Relationship with the evolution of the concept of sustainability and strategies for its implementation],” *Mem. Investig. en Ing.*, no. 15, p. 85, 2017.
- [5] Bakker, C. *et al.*, “Products that go round: exploring product life extension through design,” *J. Clean. Prod.*, vol. 69, pp. 10–16, 2014.
- [6] European Commission, “Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy,” Brussels, 2015.
- [7] Moigne, R. Le, “Why Reverse Logistics Is an Essential Part of a Circular Economy,” *Circulate News- Ellen MacArthur Foundation*, 2016.
- [8] Franco, M. A., “Circular economy at the micro level: A dynamic view of incumbents’ struggles and challenges in the textile industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 168, pp. 833–845, 2017.
- [9] Ormazabal, M. *et al.*, “Environmental training at companies. The case of Volkswagen Navarra,” in *2<sup>nd</sup> International Conference on Higher Education Advances*, 2017, pp. 1077–1084.
- [10] Matus, K. J. M. *et al.*, “Green chemistry and green engineering in China: drivers, policies and barriers to innovation,” *J. Clean. Prod.*, vol. 32, pp. 193–203, Sep. 2012.
- [11] Ormazabal, M. *et al.*, “An Overview of the Circular Economy Among SMEs in the Basque Country: A Multiple Case Study,” *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 9, no. 5, pp. 1047–1058, Dec. 2016.
- [12] ISO, “Environmental management - The ISO 14000 family of International Standards.” ISO Central Secretariat 1, Geneva, Switzerland, 2009.
- [13] Prieto-Sandoval, V. *et al.*, “ECO-labels as a multidimensional research topic: Trends and opportunities,” *J. Clean. Prod.*, vol. 135, pp. 806–818, 2016.
- [14] Thøgersen, J. *et al.*, “Consumer decision making regarding a ‘green’ everyday product,” *Psychol. Mark.*, vol. 29, no. 4, pp. 187–197, 2012.
- [15] Smith, R., “Waste management,” in *Salem Press Encyclopedia*, 2018.
- [16] Cramer, J., “Environmental management: from ‘fit’ to ‘stretch,’” *Bus. Strateg. Environ.*, vol. 7, no. 3, pp. 162–172, 1998.
- [17] Ormazabal, M. *et al.*, “Evolutionary Pathways of Environmental Management in UK

- Companies,” *Corp. Soc. Responsib. Environ. Manag.*, vol. 22, no. 3, pp. 169–181, May 2015.
- [18] ONU Habitat, “Campana global #WasteWiseCities,” *ONU Habitat*, 2019. [Online]. Available: [https://www.onuhabitat.org.mx/index.php/campana-global-wastewisecities#:~:text=ONU-Habitat alienta a todas,antes y después del consumo.](https://www.onuhabitat.org.mx/index.php/campana-global-wastewisecities#:~:text=ONU-Habitat+alienta+a+todas,antes+y+despu%C3%A9s+del+consumo.) [Accessed: 10-Aug-2020].
- [19] Hatch, Mary Jo; Cunliffe, A. L., *Organization Theory: Modern, Symbolic, and Postmodern Perspectives*, 3rd ed. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2013.
- [20] Torres, S. and A. Mejía-Villa, “A contemporary view of the concept of administration,” *Cuad. Adm.*, vol. 19, no. 32, pp. 111–133, 2006.
- [21] Morgan, G., *Images of Organization*, 2nd ed. Newbury Park, CA.: Sage Publications, 1997.
- [22] Veleva, V. *et al.*, “The need for better measurement and employee engagement to advance a circular economy: Lessons from Biogen’s ‘zero waste’ journey,” *J. Clean. Prod.*, vol. 154, pp. 517–529, 2017.
- [23] Cohen-Rosenthal, E., “A walk on the human side of industrial ecology,” *J. Compos. Mater.*, vol. 33, no. 2, pp. 928–940, Oct. 2000.
- [24] Chan, E. S. W. *et al.*, “What drives employees’ intentions to implement green practices in hotels? The role of knowledge, awareness, concern and ecological behaviour,” *Int. J. Hosp. Manag.*, vol. 40, pp. 20–28, 2014.
- [25] WTO, “La importancia del comercio de servicios,” in *EL FUTURO DEL COMERCIO DE SERVICIOS*, WTO, 2019, pp. 56–91.
- [26] Residuos, M. and M. V. Pl, “Cuentas medioambientales: Cuentas de los residuos 2017,” *Inst. Nac. Estad.*, vol. 2017, pp. 1–7, 2019.
- [27] Cardona Gallo, M., “Minimización de Residuos: una política de gestión ambiental empresarial,” *Prod. + Limpia*, vol. 1, no. 2, p. Julio-Diciembre 2006, 2006.
- [28] Zainal, Z., “Case study as a research method,” *J. Kemanus.*, vol. 9, no. Journal Article, pp. 1–6, 2007.
- [29] Sánchez-Muñoz, M. del P. *et al.*, “Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación,” *Rev. Finanz. y Polit. Econ.*, vol. 11, no. 2, pp. 321–336, 2019.
- [30] Calderón Márquez, A. J. and E. W. Rutkowski, “Waste management drivers towards a circular economy in the global south – The Colombian case,” *Waste Manag.*, vol. 110, pp. 53–65, 2020.
- [31] Sánchez-Muñoz, M. del P. *et al.*, “Análisis de la opinión de los hogares sobre la gestión de los residuos sólidos domiciliarios en Bogotá,” *Semest. Económico*, vol. 22, no. 52, pp. 97–129, 2019.
- [32] Jaca, C. *et al.*, *Economía circular - Guía para Pymes*. Pamplona, España.: EUNSA, 2018.
- [33] Kumar, V., *101 design methods: A structured approach for driving innovation in your organization*. John Wiley & Sons, 2012.