

Diseño de planta y equipo para la revalorización de residuos sólidos

Design of plant and equipment for the revaluation of solid waste

Dardo De León¹, Alejandro Hernández², Soledad Marzoa³

Recibido: Marzo 2020

Aceptado: Noviembre 2019

Resumen.- Este proyecto presenta el diseño, evaluación técnica y económica de una planta de revalorización de residuos sólidos alimenticios a través de la separación del alimento de su empaque y posterior compostaje de los residuos de alimento; haciendo fuerte hincapié en el diseño del equipo de desempaqueado, el cual procesa los envases de forma que posteriormente sea posible reciclarlos. Por otra parte, la producción de compost a partir de residuos sólidos orgánicos se presenta como una forma de revalorización de la fracción orgánica, que sustituye el método más utilizado de disposición de residuos en nuestro país, el relleno sanitario. Si bien el compostaje no ofrece grandes ganancias, como contrapartida no tiene grandes costos asociados y reduce el impacto ambiental respecto al método más habitual de disposición de residuos en el país, lo que lo transforma en una alternativa atractiva. El proyecto propone procesar 370 toneladas de residuos de alimentos por mes, generando 180 toneladas de compost por mes, calidad A o B. En cuanto a los envases, las alternativas analizadas para su reciclaje no resultaron económicamente viables por lo que se propone compactarlos y disponerlos en relleno sanitario. Si bien, este no es tratamiento esperado, disminuye el impacto ambiental con respecto a la disposición de los residuos originales. Finalmente se concluye que, dadas las condiciones actuales y el entorno de precios observados en el mercado, el proyecto es técnica pero no económicamente viable.

Palabras clave: Revalorización; residuos; compost; diseño mecánico.

Summary.- This project presents the design, technical and economic evaluation of a food solid waste revaluation plant through the separation of food from its packaging and subsequent composting of the food waste; with a strong emphasis on the design of the unpacking equipment, which processes the containers so that they can later be recycled. Besides, the production of compost from organic solid waste is presented as a way of revaluation of the organic fraction, which replaces the most widely used method of waste disposal in our country, the landfill. Although composting does not offer great profits, as a counterpart it doesn't have great associated costs and reduces the environmental impact compared with the most common method of waste disposal in the country, making it an attractive alternative. The project proposes to process 370 tons of food waste per month, generating 180 tons of compost per month, quality A or B. Regarding packaging, the alternatives analyzed for recycling were not economically viable, so it's proposed to compact and dispose it on sanitary landfill. Although this isn't the expected treatment, it reduces the environmental impact with respect to the disposal of the original waste. Finally, it is concluded that given the current conditions and the prices observed in the market, the project is technically but not economically viable.

Keywords: Revaluation; waste; compost; mechanical design.

¹Ing. Industrial, Universidad Católica del Uruguay, email: ddeleonef@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-7584-0173

²Ing. Industrial, Universidad Católica del Uruguay, email: alejandro.hernandez.ch92@gmail.com, ORCID iD: 0000-0001-5482-7255

³Ing. Industrial, Universidad Católica del Uruguay, email: maria.marzoa@ucu.edu.uy, ORCID iD: 0000-0002-2513-844X

1. Introducción.- Las alternativas actuales para la gestión de residuos pueden clasificarse y jerarquizarse en una pirámide invertida donde la prevención se encuentra en la parte superior y la eliminación en la inferior; en medio se encuentran reutilización, reciclaje y valoración. Esta metodología busca la reducción de los desechos dispuestos como pasivo ambiental.

El proyecto analizó la viabilidad de diferentes tecnologías y se optó por la clasificación mecánica para la separación de los alimentos de sus envases. Se propone revalorizar los residuos orgánicos compostándolos (reciclaje biológico) y compactar los envases para su posterior disposición. El diseño del equipo separador procesa los residuos de modo que los envases se mantengan lo más enteros posible, dejando la posibilidad de procesarlos posteriormente para finalmente reciclarlos. A diferencia de otros países donde existen limitaciones espaciales, en Uruguay es posible utilizar métodos de disposición de residuos que requieran grandes extensiones de terreno, pero por contrapartida no requieran instalaciones operacional y tecnológicamente complejas. Esto hace que el compostaje sea una tecnología atractiva que considerar.

Se encontraron pocos emprendimientos en Uruguay de mediana y gran escala que produzcan compost a partir de residuos. A modo de ejemplo se mencionan: Fundación Abonorgánico, BioTerra o Tesor.

2. Composición de los materiales a compostar.- Los materiales a procesar son residuos de alimentos líquidos, sólidos y semisólidos, quedando excluidos enlatados o aquellos con envases de vidrio, así como alimentos cárnicos, porcinos y lácteos. Los principales empaques para procesar serán entonces de papel, cartón, tetra pack, aluminio y una variada cantidad de plásticos.

Se identificó al Mercado Modelo como principal proveedor de residuos a procesar, generando un 90% de los residuos a procesar (330 ton/mes) [1]. Teniendo esto en cuenta y realizando un promedio ponderado de las propiedades [2] para elaborar un mix de los productos a procesar se determinó que éste contará con las propiedades presentadas en Tabla I - Características del mix a procesar.

	C:N mín.	C:N máx.	%N (bs) mín.	%N (bs) máx.	%H mín.	%H máx.	Densidad ap. (kg/m ³)	pH
Mix a procesar	19,04	25,30	2,01	3,35	75,59	88,00	940,00	4,62

Tabla I.- Características del mix a procesar

Dado que el mix no cuenta con los requisitos deseables de una mezcla a compostar (humedad entre 40% - 65%, C:N entre 20:1 y 40:1, pH entre 5,5 y 9,0 [3]), es que se realiza un pretratamiento con aserrín o chips de madera, urea o nitrato de potasio para ajustar estos parámetros.

3. Descripción del proceso.- Se presenta en la Figura I un esquema del proceso propuesto para la revalorización de los residuos.

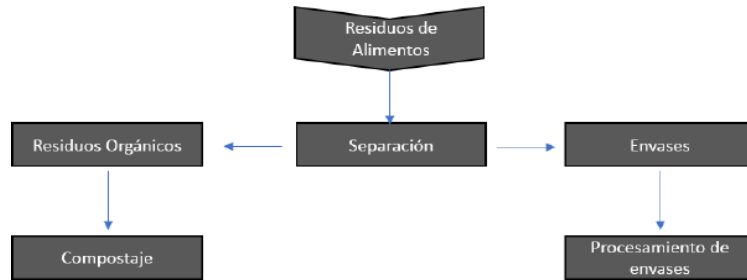


Figura I. - Flujo macro del proceso

4. Capacidad.- Para determinar la capacidad de la planta de tratamiento se analizaron datos de diversas fuentes, como ser información sobre disposición de residuos proveniente de la Dirección Nacional de Medioambiente (DINAMA), cantidad de residuos generados por empresas distribuidoras de alimentos y principalmente información sobre los residuos generados por el Mercado Modelo (85% de los residuos a procesar) [1]. Teniendo esto en cuenta y una proyección de crecimiento a 10 años, se determinó que se procesarían 370 ton/mes de residuos.

5. Descripción del proceso.- Se presentan a continuación un flujograma que ilustra el proceso de separación (Figura II) y otro en el que se observan las etapas determinadas para el proceso de compostaje (Figura III).

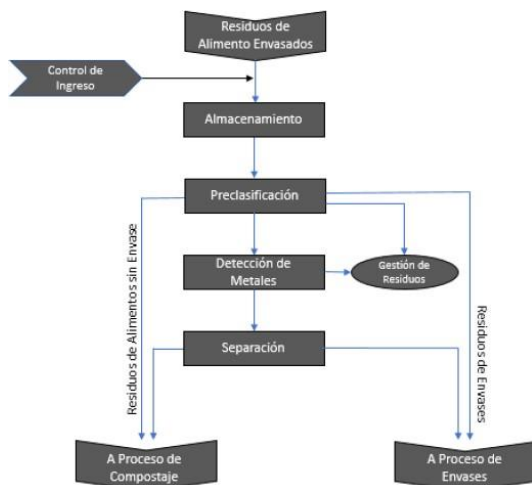


Figura II.- Proceso de separación

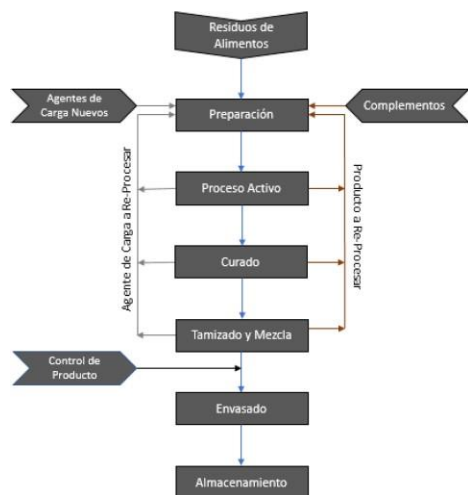


Figura III.- Proceso de compostaje (Rynk, 1992)

Se determinó un área de 600 m2 para el almacenamiento del material recibido en volquetas y pallets, el cual permite absorber posibles paradas productivas. La preclasificación se realiza en mesas de clasificación donde se desconsolidan los pallets, se retiran envases secundarios y elementos no permitidos en el proceso, etapa que requerirá de dos operarios. En el proceso de compostaje se controlan y ajustan, si fuera necesario, variables como humedad, relación carbono-nitrógeno, concentración de nitrógeno y pH. Para las etapas activa y de curado del compostaje se eligió trabajar con un modelo de pilas agitadas.

6. Planta.- La planta industrial se conforma de un conjunto de edificaciones civiles, infraestructura auxiliar e instalaciones electromecánicas diseñadas para este proyecto. Para el diseño se realizaron los estudios técnicos, económicos y legales requeridos por la normativa nacional y departamental.

Se presenta a continuación una descripción resumida del trabajo realizado.

6.1. Localización.- Para la determinación del departamento en el que se ubica la planta de separación, se realizó un análisis cualitativo jerárquico [2]. Los criterios seleccionados para determinar la macro localización fueron: fuentes de residuos de alimentos envasados, localización de consumidores de compost [3], distancia a relleno sanitario, requisitos normativos, suministro eléctrico y de agua, mano de obra disponible, accesibilidad, costo del terreno [4] y cercanía a causas de agua.

En base a los criterios antes mencionados se seleccionó la zona oeste de Montevideo como el área que presenta mayores ventajas estratégicas para la implementación de este negocio. El terreno seleccionado cuenta con un área total de 17,8 hectáreas y se ubica en el municipio G, Melilla. Este se encuentra caracterizado como zona rural de uso preferentemente agrario.

6.2. Ingenierías de planta.- Para que la planta industrial cumpla con los requerimientos necesarios para su operación continua se desarrolló la ingeniería de cada una de las instalaciones electromecánicas, el proyecto básico de la infraestructura civil y el estudio de la logística interna de la planta.

Se dimensionaron y seleccionaron equipos electromecánicos para los procesos de separación, procesamiento de envases y proceso de compostaje. Se destaca la utilización de un equipo autopropulsado de capacidad de 4.000 m³/h para el volteo de compost dentro de galpones ventilados y la utilización de un equipo de separación automático diseñado en este proyecto.

Se dimensionaron cada uno de los edificios (materiales constructivos, layout, localización, dimensiones y uso) así como los elementos requeridos para la infraestructura (caminos, explanadas, cercos y canalizaciones de pluviales). Se realizó la verificación estructural a los esfuerzos generados por vientos, de los edificios de mayor incidencia según la norma UNIT 50:[5]. Se diseñó el sistema eléctrico de potencia de la planta industrial, resultando un sistema de baja tensión con una potencia total instalada de 316 kW, potencia contratada de 152 kW y un consumo mensual estimado de 23.300 kWh. Para esto se tuvo en cuenta [6]. Se dimensionaron los sistemas de agua potable y agua de proceso, determinando una demanda diaria de 13 m³ y se seleccionaron todos los elementos de este sistema.

Se determinó el sistema de protección contra incendios según los instructivos técnicos de la Dirección Nacional de Bomberos [7], concluyendo un sistema integrado de detección y alarma de incendio, señalización de emergencia, extintores portátiles y un sistema hidráulico distribuido de bocas de incendio, las cuales son alimentadas por un equipo de bombeo de una capacidad de 200 l/min a una presión de 5,0 kg/cm².

Para alcanzar las condiciones de salubridad indicadas en el [8] se desarrolló el proyecto de ventilación para cada uno de edificio, para los cuales se utilizaron equipos activos para la extracción o inyección de aire y equipos estáticos para extracción natural.

6.3. Estudio ambiental.- Se realizó un estudio de impacto ambiental buscando minimizar los factores que generan impactos ambientales negativos. Se propusieron medidas de mitigación para

cada uno de los impactos detectados en las etapas de instalación, operación y abandono del proyecto.

La principal mitigación de los impactos ambientales negativos detectados fue el tratamiento de los efluentes líquidos de la operación de la planta (ver Tabla II). La problemática reside en que la carga orgánica y los nutrientes superan ampliamente los valores de vertido permitidos por la normativa nacional lo cual se ve agravado por estar ubicados en la zona de la cuenca del río Santa Lucía donde los requerimientos de vertido son más estrictos [9].

DQO (mg/l)	7.400 – 10.900
DBO ₅ (mg/l)	5.000 – 9.600
pH	8
N _{tot} (mg/l)	150 – 900
P _{tot} (mg/l)	10 - 40

Tabla II - Parámetros característicos de efluentes líquidos del proceso

Luego de realizar una análisis técnico y económico de diferentes tecnologías para el tratamiento de efluentes se determinó tratarlos mediante un sistema de lagunas anaerobias, facultativas y de maduración combinado con un tratamiento fisicoquímico previo [10-11]. Para este tipo de tecnología se definieron todas las variables de proceso como también todos los sistemas auxiliares (infraestructura civil y sistemas electromecánicos) para su correcto funcionamiento. En la Figura IV, puede observarse un esquema de la solución propuesta.

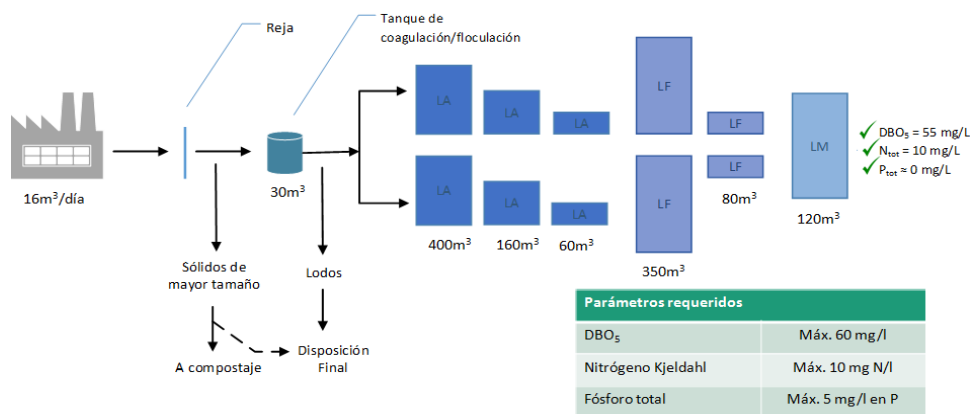


Figura IV.- Sistema de lagunas y parámetros requeridos para vertido de efluentes

7. Equipo separador.- De manera simplificada se puede describir al equipo separador como una envolvente cilíndrica con un eje concéntrico, el cual cuenta con paletas que se disponen sobre el mismo. Se pueden reconocer dos secciones distintas (ver Figura V), la zona de rotura (1) donde los envases son desgarrados y la de vaciado (2) donde se separa el alimento de sus empaques.

Para cada una de las zonas se diseñó la geometría de las paletas y su disposición con respecto al eje, de modo de favorecer la función de cada una de las secciones. En la primera zona se agregaron cuchillas estáticas (barras abulonadas a la envolvente) que facilitan el desgarro de los paquetes. La zona de vaciado cuenta con una criba en la zona inferior de la envolvente, que facilita la separación. Los alimentos egresan del equipo por esta criba y los envases avanzan y abandonan el equipo más adelante en el recorrido del equipo.

7.1. Selección de tecnología.- Se trabajó con una selección multicriterio para la cual se implementó una herramienta denominada “Proceso Analítico Jerárquico” [2]. Dicha herramienta proporciona una metodología que permite integrar tanto los aspectos tangibles como los intangibles al momento de la selección.

Se utilizan para esto, los siguientes criterios: aptitud para el procesamiento, potencia utilizada, tamaño, eficiencia en la separación, condición final de los envases, condición final de los residuos de alimentos y facilidad de constructiva. Adicionalmente se evaluaron siete equipos existentes en el mercado.

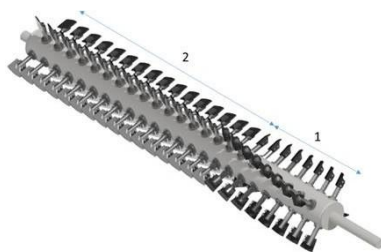


Figura V.- Eje del equipo separador con zonas de rotura (1) y separación (2) identificadas

La tecnología seleccionada a raíz de la evaluación cuantitativa y cualitativa mencionada anteriormente es la de rotor/envolvente, en su modalidad de envolvente estática y rotor con paletas.

7.2. Ensayos.- Con el fin de estimar la potencia necesaria para separar los envases de su contenido, se realizaron mediciones de la energía disipada en la rotura de diferentes productos por el impacto de una paleta, que posteriormente se escaló a la totalidad de las paletas del equipo. Se diseñaron para esto, una serie de ensayos para los cuales se construyó un péndulo de impacto que permitiera llevar adelante las correspondientes mediciones. En los ensayos se variaron parámetros como ser el tamaño, forma y posición de las paletas de rotura, buscando minimizar la energía disipada en los impactos para definir características constructivas del equipo.

A partir de los ensayos realizados se concluye que el modelo de paleta de rotura más adecuado es la denominada “Paleta 80”. Ésta cuenta con una forma trapezoidal y un ancho de 80mm en la base mayor, la cual se biseló en la zona más próxima a la envolvente. Este último mecanizado aumenta la efectividad en la rotura y reduce la energía requerida para esto. En cuanto al ángulo de ataque⁴ se concluye que un ángulo 40° minimiza la energía necesaria para la rotura y otorga mayor efectividad en la misma.

Por otra parte, se determinó que la energía media disipada debido a cada uno de los impactos es de aproximadamente 22 J para el peor de los productos ensayados. Mediante los ensayos de impactos sucesivos se construyó una función que permite aproximar un valor de energía disipada en función del número de golpes recibidos por un mismo envase. Esta función, entre otros factores, es utilizada para estimar la potencia necesaria por el equipo final.

7.3. Modelo matemático.- La cantidad de variables a evaluar en el sector de rotura del equipo, conducen al desarrollo de un modelo matemático basado en la geometría del equipo. Este modelo es potenciado utilizando en el software Scilab el cual permite analizar la hipótesis tomada para la

⁴ Ángulo formado entre el eje del equipo y la paleta.

secuencia de impactos en cada ángulo de giro del rotor. En el caso del sector de vaciado, dada su mayor simplicidad, es posible analizar su comportamiento mediante la utilización de hojas de cálculo de Excel.

El modelado matemático permitió determinar una serie de mejoras al diseño inicial del equipo respecto a la cantidad y disposición de las paletas, cuchillas estáticas y potencia. En el sector de rotura este estudio permite evaluar diferentes configuraciones respecto a la ubicación de las cuchillas estáticas y la ubicación relativa de las paletas. A partir de esto se selecciona una combinación de 4 paletas por arreglo⁵, 7 cuchillas estáticas en la envolvente y un desfase de 5 grados entre arreglos. Esta disposición reduce la variación de la potencia en una vuelta completa del rotor y minimiza la potencia requerida, cumpliendo con los requisitos geométricos para que sea viable el procesamiento de productos con las dimensiones definidas en el proyecto.

Mediante el modelo también se pudo estimar que la potencia total varía entre 22,8 kW (30,5 HP) y 27,5 kW (37 HP), con ciclos que se repiten con una frecuencia de un cuarto de revolución. Puede observarse en la figura VI la potencia consumida total y en cada uno de los sectores del equipo, en función del ángulo de giro del rotor.

Se determinó una potencia media consumida de 25,2 kW (33,6 HP). Para la selección del motor se consideraron la inercia propia del rotor, la del sistema de transmisión y la del equipo motriz. Con lo que se concluye que la inercia permite sobrellevar los picos de potencia sin la necesidad de instalar un motor que cubra la potencia máxima.



Figura VI- Potencia consumida en función del ángulo de giro del rotor

7.4. Diseño mecánico en software de elementos finitos.- Cada uno de los componentes del equipo se diseñaron individualmente y se probaron bajos estados de cargas representativos de las condiciones críticas de la operación, mediante el software de cálculo Autodesk Inventor. Los conjuntos de piezas ensamblados también se ensayaron en modelos simplificados para corroborar las hipótesis de funcionamiento y determinar posibles puntos de falla.

7.5. Prototipo.- En la etapa inicial del proyecto se construyó un prototipo básico del equipo separador que permitió realizar ensayos para definir parámetros de funcionamiento y obtener información para proponer mejoras al mismo. Los ensayos realizados en el prototipo tuvieron como objetivo determinar del tiempo de residencia, verificar la calidad de la separación, observar el comportamiento de los productos dentro del equipo en funcionamiento y evaluar la potencia del motor. Si bien los resultados de los ensayos para determinar la capacidad de procesamiento y la

⁵ Se entiende por arreglo una sección ortogonal al eje que contiene cierta distribución de paletas. En el arreglo siguiente se repite esta distribución.

calidad de separación no fueron concluyentes, permitieron encontrar detalles constructivos que fueron mejorados en el diseño del equipo final del equipo.

7.6. Diseño final.- En base a los ensayos, observaciones y modelos realizados, se generó un modelo final del equipo que se denominó Depacker DHM1 (figura VII). Su objetivo es separar los residuos de alimentos de sus respectivos envases y cuenta con una capacidad de procesamiento de 3.000 kg de residuos por hora. Sus dimensiones principales son: 2400 mm de largo, 500 mm de ancho y 1200 mm de altura, sin incluir el sistema de transmisión, la tolva y la plataforma. Tiene un peso total aproximado de 500 kg.

La máquina posee con un motor trifásico de 30 kW y velocidad nominal de 1490 rpm. La potencia es transmitida al eje de la máquina mediante una transmisión por correas con una reducción variable que le permite velocidades de entre 150 y 750 rpm. Se encuentra construido mayoritariamente de acero inoxidable AISI 304 a excepción de las paletas de rotura y las cuchillas estáticas que se conforman con un acero aleado de alta tenacidad.

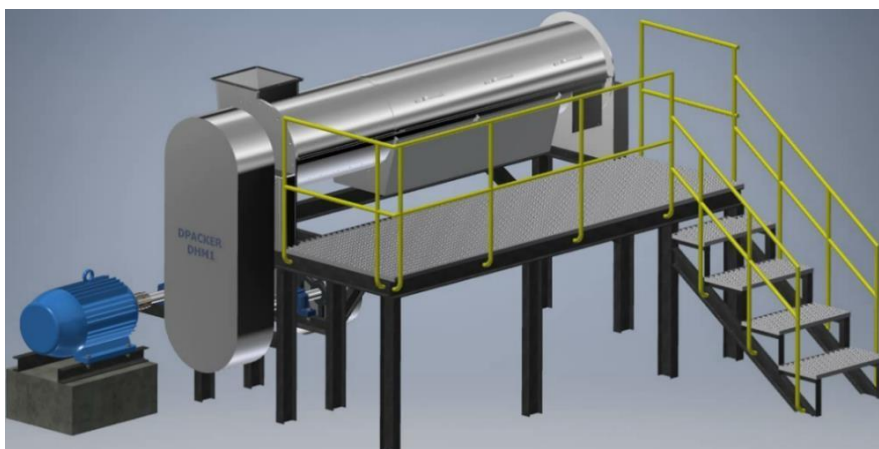


Figura VII.- Ilustración del diseño final del equipo separador Depacker DHM1

8. Conclusión.- Se considera un proyecto valioso dado que trae consigo un desarrollo tecnológico nacional y una alternativa a la problemática de tratamiento de residuos sólidos de alimentos para el país, principalmente en Montevideo; reduciendo significativamente el volumen de residuos destinados a relleno sanitario. Sin embargo, el estudio financiero concluye que el proyecto no es económicamente viable por sí solo, por lo que dependería de financiamiento para llevarse adelante. Cabe destacar que nos encontramos en un momento de revisión a nivel nacional y global respecto a los procesos de gestión de residuos, lo que podría conducir a modificaciones en normativas nacionales al respecto. Esto podría impactar en el estudio financiero y transformarlo en una alternativa viable.

9. Referencias

- [1] Observatorio Granjero, “Mercado Modelo: anuario estadístico,” Montevideo: Observatorio Granjero, 2017.
- [2] J. Jiménez, “El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones,” *R Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, vol. 1, 2002.
- [3] MGAP, *Regiones Agropecuarias del Uruguay*, Montevideo: MGAP, 2015.
- [4] Uruguay XXI, “Uruguay XXI promoción de inversiones y exportaciones: costos de instalación,” 2017. [Online]. Available: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/costos-de-instalacion/>.
- [5] UNIT, 50:1984 “Acción del viento sobre construcciones,” Montevideo: UNIT, 1984.
- [6] UTE, “Reglamento de Baja Tensión,” [Online]. Available: <https://portal.ute.com.uy/clientes/tramites-y-servicios/tecnicos-y-firmas-instaladoras/reglamento-de-baja-tension> .
- [7] *Decreto 150/016*, 2016.
- [8] *Decreto 406/88 Prevención de accidentes de trabajo*.
- [9] *Decreto 253/79*.
- [10] M. v. Sperling, *Waste Stabilisation Ponds*. London: IWA Publishing, 2007.
- [11] M. I. Aguilar, J. Sáez, M. Lloréns, A. Soler, and J. F. Ortuño “Nutrient removal and sludge production in the coagulation–flocculation process,” *Water Research*, vol. 36, n°11, 2002.