

ANÁLISIS Y MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIVIENDA FLOTANTE EN ZONAS DE INUNDACIÓN EN EL BARRIO SANTANDER DEL MUNICIPIO DE PUERTO LÓPEZ - META

ANALYSIS AND MODELING OF THE BEHAVIOR OF A FLOATING HOUSING IN FLOOD ZONES IN THE SANTANDER NEIGHBORHOOD OF THE MUNICIPALITY OF PUERTO LÓPEZ - META

María Andrea Beltrán Acevedo

Estudiante, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, mariabeltrana@usantotomas.edu.co

María Luisa Beltrán Acevedo

Estudiante, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, maria.beltrana@usantotomas.edu.co

Resumen: El presente documento consiste en el análisis y modelación del comportamiento de una vivienda flotante, con el cual se pretende dar solución a los problemas que implican los eventos de inundación generados por el incremento del cauce del río Metica sobre el barrio Santander en Puerto López Meta.

El modelo está compuesto por una estructura flotante y otra habitable, estas se diseñaron a partir de los parámetros definidos en la Resolución 1918 de 2015 y la NSR-10, respectivamente. Además, se realizó un análisis de flotabilidad y estabilidad, con el que se determinó que la estructura tiene la capacidad de flotar y mantenerse en equilibrio.

Adicionalmente, por medio de una revisión bibliográfica se estableció un sistema de anclaje para restringir los desplazamientos horizontales de la vivienda y se realizó una propuesta para el suministro de los servicios básicos. Finalmente, se calculó el presupuesto del modelo, como guía para una futura construcción.

Palabras clave: Energía renovable, Estabilidad, Flotabilidad, Sistema de anclaje, Vivienda flotante.

Abstract: The present document consists of analysis and modeling of the behavior of a floating house, with which it is intended to solve the problems imply in the flood events generated by the increase of the Metica riverbed over Santander neighborhood in Puerto López Meta.

The model consists of a floating structure and another habitable structure, these were designed from the parameters defined in Resolution 1918 of 2015 and the NSR-10, respectively. In addition, a buoyancy and stability analysis was carried out, which determined that the structure has the ability to float and remain in balance.

Additionally, through a bibliographic review an anchorage system was established to restrict horizontal displacement of housing and a proposal was made for the provision of basic services. Finally, the model's budget was calculated as a guide for future construction.

Keywords: Anchor system, Floatability, Floating housing, Renewable energy, Stability.

1. INTRODUCCIÓN

Las constantes precipitaciones en el país han generado un aumento desmesurado del nivel de caños, quebradas, ríos, lagos, lagunas y mares; ocasionando que las personas cuyas viviendas se encuentran construidas en las zonas bajas y cercanas a dichos afluentes se vean afectadas frente a los casos de inundación. Sin embargo, las precipitaciones no son lo único que provoca dichos eventos, también se debe a la intervención del hombre, que a lo largo de los años ha desviado el curso de ríos para actividades agrícolas y deforestado gran cantidad de bosques, disminuyendo la absorción de agua.

Las precipitaciones producidas en temporada de invierno afectan a la región de la Orinoquía, especialmente al departamento del Meta, donde se observa un incremento en el cauce de los ríos Guacavía, Guamal, Guatiquía, Guavio, Guayuriba, Humadea, Humea, Metica y Negro, los cuales de acuerdo con los registros del IDEAM presentan crecientes con valores elevados, superando las cotas de afectación en algunos municipios, como Puerto López [1].

Este municipio no posee métodos de prevención para el crecimiento del cauce de sus afluentes (río Metica y río Negro), no se ha realizado la reforestación en las orillas de ríos, limpieza en el sistema de alcantarillado, la construcción de muros de contención, espolones, trampas de sedimentos, diques, jarillones o terraplenes; causando que un gran número de viviendas se vean perjudicadas por las crecientes, principalmente aquellas que se encuentran ubicadas en el barrio Santander, donde se han originado problemas en la salud de los habitantes, desplazamiento de especies que pueden llegar a alterar el balance de los ecosistemas existentes y deterioro en la infraestructura y en acabados.

Con el fin de mitigar los efectos adversos de las inundaciones, en este proyecto se analiza y modela el comportamiento de una vivienda flotante, teniendo en cuenta las diferentes normas vigentes, caracterización de la zona de estudio, principios de flotabilidad y estabilidad; se propondrá un sistema de servicios básicos a través del uso de energía sostenible, para garantizar y mejorar la calidad de vida de los habitantes del sector, y adicionalmente se realizará el presupuesto para la futura construcción de este modelo.

2. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

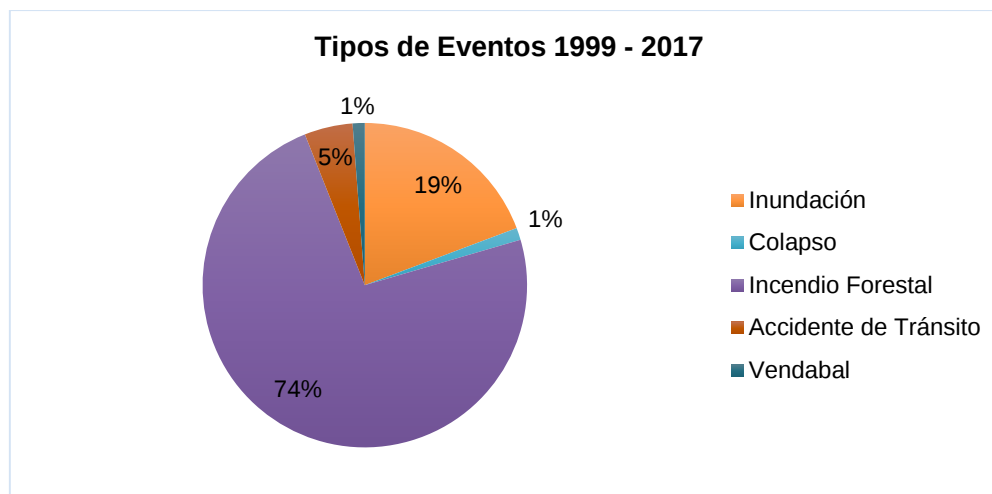
2.1 Caracterización de la zona de estudio

El municipio de Puerto López se encuentra ubicado al centro norte del departamento del Meta y es conocido a nivel nacional como el centro geográfico de Colombia; tiene una extensión aproximada de 6740 Km², de los cuales solo 9,5 Km² pertenecen al área urbana; además presenta un clima semihúmedo, donde los meses más lluviosos son junio y julio, con valores promedios de temperatura de 24 °C, mientras que en enero y febrero se presentan los periodos más secos con temperaturas que superan los 28 °C. [2]

Puerto López hace parte de la cuenca más extensa de la Orinoquía (río Meta), la cual recorre al municipio en 161 Km por el costado derecho y 14 Km por el costado izquierdo, representando para la población portolopense y la región de la Orinoquía un vínculo especial, ya que por su capacidad de navegabilidad permite desarrollar actividades comerciales como el transporte de alimentos, ganado y mercancías a municipios como Puerto Gaitán, a departamentos como el Vichada y el Casanare y al país de Venezuela; además, permite la realización de actividades como la pesca. [3]

La Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) dispone de un registro de eventos históricos sucedidos en Puerto López desde el año 1998 hasta 2017 (Ver Gráfica 1); en los cuales se observa que el municipio presenta gran vulnerabilidad a incendios forestales y a eventos de inundación, las cuales son debidos a las crecientes del Río Metica y del Caño Banderas; dejando a cientos de familias damnificadas, perdidas millonarias de cultivos, daños ambientales, entre otros impactos. [4]

Por otro lado, la geomorfología de Puerto López es el resultado de procesos denudativos, acumulativos y climáticos, afectados principalmente por el levantamiento de la Cordillera Oriental y depositados posteriormente en la Cuenca de los Llanos Orientales; las unidades geomorfológicas en su totalidad son de origen fluvial y lagunar formadas a partir de procesos de sedimentación y erosión correspondientes a la dinámica fluvial de los ríos, caños y otros cuerpos hídricos. En la cabecera municipal se presentan unidades de planicie aluvial, que se caracterizan por tener un microrelieve que es plano-cóncavo con pendientes entre 1% y 3%, generando inundaciones frecuentes; en el área rural se observan unidades correspondientes de terraza antigua, terraza aluvial y planicie aluvial. [4]



Gráfica 1 COMPILACIÓN DE DESASTRES DE PUERTO LÓPEZ, META
Fuente: UNGRD, 2018

2.1.1 Vulnerabilidad a inundación

Puerto López tiene alta susceptibilidad a inundación debido a su riqueza hídrica, ya que se encuentra dentro de la cuenca del río Meta, la cual nace en la Cordillera Oriental; incrementando la probabilidad de inundación en el municipio por la intensidad de precipitación en dicha cordillera y en la zona del piedemonte llanero; otro factor que influye son las características del suelo, dado que se presentan planicies aluviales, formadas por depósitos aluviales y eólicos. [4]

Sin embargo, las inundaciones no solo se producen por aspectos climáticos, sino también por el tipo de geomorfología y la influencia antrópica cerca de las rondas hídricas (principales causantes de los daños a los sistemas fluviales), ya que generan cambios en la dirección del cauce, provocando otros fenómenos (socavación, sedimentación) que si no se controlan podrían ocasionar grandes problemas ambientales y socioeconómicos. [4]

La vulnerabilidad a inundación del municipio es alta por la ausencia de obras de infraestructura que eviten estos fenómenos y por la cercanía de viviendas al río Metica y al caño Banderas, que al momento de presentarse el desbordamiento incontrolado de estos cauces generan grandes pérdidas económicas y disminuyen la calidad de vida de la población.

2.2 Diseño de la estructura habitable

El proyecto contempla el diseño arquitectónico de una vivienda de un solo nivel o planta, la distribución espacial se ajusta a la de una vivienda convencional compuesta por una sala, cocina, comedor, patio, cuarto de ropas, dos habitaciones y dos baños; pensando en las condiciones básicas y la comodidad de una familia promedio en Colombia (4 personas); el modelo tiene un área total de 83,65 m² y un área bajo cubierta de 69,3 m².

Las dimensiones y propiedades del material para las vigas y columnas fueron suministradas por el catálogo de productos COLMENA para perfiles estructurales tubulares; en la Tabla I y Tabla II se especifican las propiedades de la sección PTE 300x300x10 mm.

Tabla I PROPIEDADES DE LA SECCIÓN PTE 300X300X10

H (mm)	B (mm)	t (mm)	R (cm)	A (cm ²)	S _x (cm ³)	Z _x (cm ³)	I _x (cm ⁴)	h (mm)	h (mm)	r (mm)
300	300	10	11,77	113,42	1047,59	1223,86	15713,90	240	240	20

Fuente: Autor

Tabla II PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA SECCIÓN PTE 300X300X10

Fy		Fu		E
PSI	kg/cm ²	PSI	kg/cm ²	Kg/cm ²
50000	3522	62000	4368	2040000

Fuente: Autor

2.2.1 Avalúo de cargas

En el avalúo de cargas se tuvo en cuenta la carga muerta (peso de los elementos estructurales y no estructurales) y la carga viva de la vivienda, para establecer la carga total de la estructura habitable, en la Tabla III se registró un resumen de las cargas a las que se encuentra expuesta la estructura.

Tabla III RESUMEN DE CARGAS DE LA ESTRUCTURA HABITABLE

Componente	Peso total (KN)	Área en Planta (m ²)	Carga Muerta (KN/m ²)	Carga Viva (KN/m ²)	Carga Total (KN/m ²)
Peso propio de la estructura	221,004	83,65	2,642	1,8	4,442
Cubierta	172,139	74,118	2,323	0,5	2,823
Σ	393,142	-	4,965	2,3	7,265

Fuente: Autor

2.2.2 Grado de irregularidad de la estructura

En el diseño sísmico de la vivienda es importante señalar el grado de irregularidad de la estructura, evidenciado en el alzado (altura), planta y en la redundancia del sistema de resistencia sísmica de pórticos; en el numeral A.3.3 de la NSR-10 se describe y especifica los tipos de irregularidades para determinar los coeficientes de reducción de energía causados por irregularidades en altura (ϕ_a), en planta (ϕ_p) y por la ausencia de redundancia (ϕ_r) que presenta la vivienda [5]; los cuales se evidencian en la Tabla IV.

Tabla IV COEFICIENTES DE GRADO DE IRREGULARIDAD

Irregularidad	Coeficiente ϕ	Referencia
En planta	1	Tabla A.3-6
En alzado	1	Tabla A.3-6
Ausencia de redundancia	1	A.3.3.8

Fuente: Autor

2.2.3 Capacidad de disipación de energía

Para determinar el coeficiente de capacidad de disipación de energía que se empleó en el diseño, primero se estableció el coeficiente de capacidad de disipación de energía básico, el cual está relacionado con el sistema estructural de resistencia sísmica y con el grado de disipación de energía del material estructural; para esto se tuvo en cuenta que la ubicación del área de estudio (Puerto López) se encuentra en una zona de amenaza intermedia [5], por lo tanto, se definió que el grado de disipación de energía para el proyecto corresponde a Disipación de Energía Moderada – DMO.

Adicionalmente se eligió el sistema estructural de la vivienda, el cual tiene las características de un sistema de pórticos resistente a momentos en acero; con estos datos, se procedió a identificar el valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía básico - R_0 (Tabla V).

Tabla V SISTEMA ESTRUCTURAL DE PÓRTICO RESISTENTE A MOMENTOS

Sistema de Pórtico Resistente a Momentos		R_0	Ω_0	Zonas de Amenaza Sísmica					
				Alta		Intermedia		Baja	
Sistema resistencia sísmica	Sistema resistencia para cargas verticales			Uso permit.	Altura máx.	Uso permit.	Altura máx.	Uso permit.	Altura máx.
Pórticos resistentes a momentos con capacidad moderada de disipación de energía (DMO)									
De acero	El mismo	5	3	No se permite		Si	Sin límite	Si	Sin límite

Fuente: NSR 10 - Título A - Tabla A.3-3

Dado que la vivienda es una estructura de acero, en donde las uniones de su sistema van hacer soldadas en obra, la NSR-10 establece que el valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía básico se debe multiplicar por 0,9 [5]; considerando los coeficientes de irregularidades y de disipación de energía básico, se identificó el valor coeficiente de capacidad de disipación de energía (R) para ser empleado en el diseño, dado por la siguiente ecuación:

$$R = \phi_p \phi_a \phi_r R_0 \quad (1)$$

$$R = 4,5$$

2.2.4 Movimiento sísmico de diseño

El movimiento sísmico de diseño se define con base a las siguientes condiciones:

- ✓ Establecer en qué tipo de zona de amenaza sísmica se encuentra ubicada el área de estudio, para poder identificar los valores de la aceleración pico efectiva (A_a) y la velocidad horizontal pico efectiva (A_v). [5]
- ✓ Especificar el grupo de uso de la estructura para obtener el coeficiente de importancia de la misma. [5]
- ✓ Determinar los coeficientes de amplificación que afectan la aceleración en periodos cortos (F_a) e intermedios (F_v), calculados por medio de las características del suelo subyacente en el área de estudio. [5]

De acuerdo con lo planteado en el proyecto y a la propuesta arquitectónica, el uso de la estructura es residencial, por lo tanto, pertenece al grupo de uso I, con un valor de coeficiente de importancia (I) [5]; igualmente, la norma especifica los coeficientes de la aceleración horizontal pico efectiva (A_a) y velocidad horizontal pico efectiva (A_v) para cada uno de los municipios del país, los coeficientes usados para el proyecto se especifican en la Tabla VI.

Tabla VI VALORES DE A_a , A_v , A_e , A_d Y DEFINICIÓN DE LA ZONA DE AMENAZA SÍSMICA

Municipio	Código municipio	A_a	A_v	Zona de Amenaza Sísmica	A_e	A_d
Puerto López	50573	0,05	0,15	Intermedia	0,04	0,02

Fuente: NSR-10 (Apéndice A-4)

Los valores de F_a y F_v están relacionados por el tipo de perfil de suelo del lugar del proyecto, utilizando un estudio de vulnerabilidad realizado en el municipio de Puerto López, se establece que el perfil de suelo de la zona de estudio es tipo D [6]. Teniendo en cuenta lo anterior, se estableció el valor de los coeficientes F_a y F_v por medio de la Tabla A.2.4-3 y Tabla A.2.4-4 respectivamente de la NSR-10; mientras que la estimación del periodo fundamental de la estructura (T) se determinó por medio de la siguiente ecuación:

$$T = C_t h^\alpha \quad (2)$$

Donde,

T es el periodo fundamental de la estructura.

h es la altura en metros.

C_t y α son valores que están en función del tipo de sistema estructural de resistencia sísmica (Tabla VII)

Tabla VII VALOR DE LOS PARÁMETROS C_t Y α

Periodo fundamental de la edificación		
Sistema estructural	C_t	α
Pórticos resistentes a momentos de acero estructural que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0,072	0,8

Fuente: NSR-10 – Tabla A.4.2-1

En la Tabla VIII se presentan los parámetros sísmicos obtenidos para la construcción del espectro elástico de aceleración de diseño.

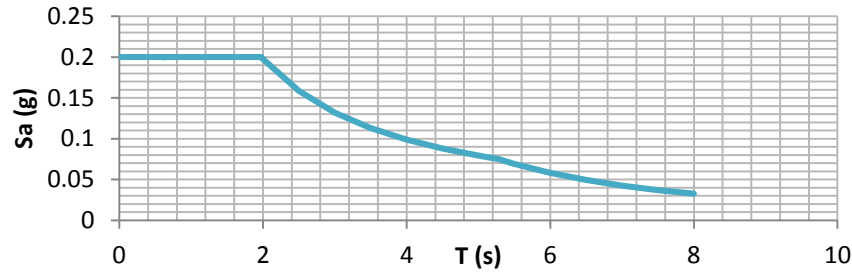
Tabla VIII PARÁMETROS SÍSMICOS PARA EL ESPECTRO ELÁSTICO

A_a	A_v	F_a	F_v	I	T (s)
0,05	0,15	1,6	2,2	1	0,205

Fuente: Autor

Posteriormente se determinó el espectro de aceleración de diseño para el periodo de vibración – S_a (Gráfica 2).

Espectro de Elástico de Aceleración de Diseño



Gráfica 2 ESPECTRO ELÁSTICO DE ACELERACIÓN DE DISEÑO

Fuente: Autor

2.2.5 Fuerza horizontal equivalente

Con el propósito de definir la fuerza sísmica horizontal (F_x) en estructuras que pertenecen al grupo de uso I y que están localizadas en zona de amenaza sísmica intermedia, la NSR-10 establece que el método de la fuerza horizontal equivalente se puede utilizar en cualquier edificación regular e irregular [5]; considerando que para el cálculo de la fuerza sísmica horizontal se tiene que:

$$F_x = C_{vx} * V_s \quad (3) \quad C_{vx} = \frac{m_x * h_x^k}{\sum_{i=1}^n (m_i * h_i^k)} \quad (4) \quad V_s = S_a * g * M \quad (5)$$

Donde,

F_x es la fuerza sísmica horizontal

C_{vx} es un coeficiente

V_s es el cortante sísmico en la base

M es la masa total de la edificación

m_i , m_x son parte de M que está colocada en el nivel i o x

h_i , h_x son la altura en metros, medida desde la base, del nivel i o x

k es el exponente relacionado con el periodo fundamental de la edificación, el cual se obtiene con los siguientes parámetros:

- ✓ $T \leq 0,5 \text{ s} \rightarrow k = 1,0$
- ✓ $0,5 \text{ s} \leq T \leq 2,5 \text{ s} \rightarrow k = 0,75 + 0,5T$
- ✓ $T \geq 2,5 \text{ s} \rightarrow k = 2,0$

Considerando lo anterior, se realizó el cálculo de la fuerza horizontal producida en la cubierta y primer piso; los resultados obtenidos se organizaron en la Tabla IX.

Tabla IX FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE

Piso	W_i (KN)	h (m)	h^k (m)	$W_i * h^k$ (KN-m)	C_{vi}	F_{xi} (KN)	V_{it} (KN)
Planta 1	418,049	2,75	2,75	1149,635	1,0	83,61	83,61
Σ	418,049			1149,635	1,0	83,61	

Fuente: Autor

2.2.6 Combinaciones de cargas mayoradas

Las resistencias de diseño de los elementos estructurales, deben igualar o exceder los valores generados por las cargas mayoradas de las combinaciones básicas establecidas en el numeral B.2.4.2 de la NSR-10 [7], en la Tabla X se especificaron las combinaciones de carga mayoradas usadas en el proyecto.

Tabla X COMBINACIONES DE CARGAS MAYORADAS

Combinación	Carga Mayorada
1,4 D	$1,4 * (5,301)$ 7,421 KN/m ²
1,2 D + 1,6 L	$1,2 * (5,301) + 1,6 * (2,3)$ 10,041 KN/m ²

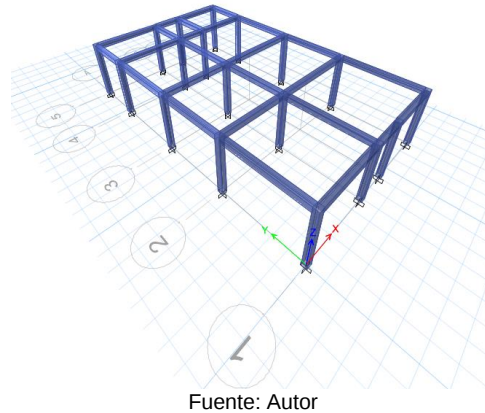
Fuente: Autor

Donde, D es la carga muerta y L la carga viva de toda la estructura; por lo tanto, se obtiene que la carga mayorada a la cual se debe igualar o exceder la resistencia de diseño de los elementos estructurales es de 10,041 KN/m².

2.2.7 Modelación de la estructura

La modelación de la vivienda en un sistema de pórticos resistente a momentos en acero, se realizó con el fin de verificar de las derivas conforme a la fuerza sísmica aplicada y de este modo efectuar el diseño de cada uno de los elementos estructurales, teniendo en cuenta las diferentes combinaciones de cargas establecidas por la NSR-10 y la fuerza sísmica equivalente. Dicha modelación se ejecutó por medio del software ETABS.

Fig. 1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA HABITABLE



2.3 Diseño de la estructura flotante

El diseño de la estructura flotante se realizó de acuerdo con las especificaciones y requerimientos definidos en los capítulos 6 y 7 del Decreto 2049 de 1956, en los cuales se establecen una serie de condiciones para las dimensiones y propiedades de los elementos necesarios para el diseño de una embarcación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que según el artículo 6-1-2, los requerimientos y especificaciones solo se pueden aplicar si la estructura cumple las siguientes condiciones, de lo contrario se deberá realizar un diseño especializado. [8]

- ✓ Eslora (E) < 30 veces el puntal costado (PC)
- ✓ Manga (M) < 6 veces el puntal costado (PC)
- ✓ Eslora (E) < 5 veces la manga (M)

Para verificar el cumplimiento de las condiciones mencionadas y efectuar los diferentes cálculos de flotabilidad y estabilidad de la estructura flotante, se propusieron las dimensiones organizadas en la Tabla XI.

Tabla XI DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA FLOTANTE

Detalle	Medida (m)
Eslora (E)	14
Eslora en el plan (E1)	13,4
Eslora mínima de flotación (E2)	13,99
Eslora máxima de flotación (E3)	14
Manga en el plan (M1)	8,15
Manga (M)	8,75
Francobordo (FB)	0,5
Puntal Costado (PC)	1,5
Calado Vacío (CV)	0,25
Puntal Útil (PU)	0,75

Fuente: Autor

Con los datos de la tabla anterior, se verificó el cumplimiento de las condiciones mencionadas (Ver Tabla XII), para lo cual se obtuvo que se pueden aplicar los requerimientos y especificaciones del decreto 2049 de 1956 para el diseño de dicha estructura.

Tabla XII VERIFICACIÓN DE CONDICIONES PARA LAS DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA FLOTANTE

Condiciones		Criterio
E (m)	< 30PC (m)	Cumple
14	< 45	
M (m)	< 6PC (m)	Cumple
8,75	< 9	
E (m)	< 5M (m)	Cumple
14	< 43,75	

Fuente: Autor

En los capítulos 7 y 21 de la norma para construcción, inspección y clasificación de embarcaciones (decreto 2049 de 1956) se establecen una serie de parámetros y recomendaciones que permiten determinar los espesores mínimos de las planchas del casco de la estructura flotante (fondo y costados 2,8 mm; cubierta y mamparos 2,5 mm y pantoques 3,5 mm), asimismo se definieron las dimensiones de las platinas de refuerzo para las cuernas (3" X 1/4") y los ángulos esquineros para la unión de las planchas de cubierta y costado (4,69 mm).

2.4 Sistema de anclaje

En el momento que se presente un evento de inundación, la vivienda flotante se verá expuesta a movimientos en sentido vertical y horizontal; por lo tanto, se debe implementar un sistema que garantice el ascenso de la estructura pero que restrinja su traslado de ubicación. Actualmente, existen diversos sistemas que permiten la inmovilización de plataformas flotantes, entre los cuales cabe destacar el sistema de vigas-guía (vigas HEB), anclaje muerto (pesos de hormigón armado) y pilotado o de parales.

2.4.1 Sistema pilotado o de parales

Está formado por parales fijados en el terreno, los cuales se ubican en cada vértice de la estructura y se conectan mediante anillos metálicos, estos se acoplan o ensamblan a la estructura, permitiendo que la plataforma flotante se deslice de manera vertical a partir de la variación de los niveles de inundación [9]; el material constructivo de los parales o pilotes puede ser madera, concreto, acero o PVC [10].

Este sistema a diferencia de los otros dos, no requiere ser fijado a un muelle (Vigas-guía) ni disponer de un mayor espacio para su implementación (Anclaje muerto); sin embargo, la desventaja de este sistema es que dependiendo del material empleado se debe aplicar un tratamiento a cada paral para que soporte estar en contacto con el agua y es necesario realizar un estudio de suelos, para el diseño de la cimentación de cada paral, ya que se encuentra fijo al terreno.

Sin embargo, a pesar de que se deben proteger los parales de madera y acero, estos son los que mayor resistencia presentan debido a sus diferentes propiedades y especificaciones; por lo tanto, el sistema de anclaje que se empleó para la vivienda flotante fue el sistema pilotado o de parales en acero, el cual está compuesto por 4 parales ubicados en cada vértice de la estructura flotante, donde cada paral tiene las siguientes características:

- ✓ Perfil estructural redondo de 8" de diámetro por 4 m de alto
- ✓ El sistema de conexión es un anillo metálico de 1,5 m X 0,2 m en lámina H.R de 3/16"
- ✓ Tratamiento anticorrosivo

Es importante mencionar que, se implementó el acero como material de construcción de los parales, ya que posee alta resistencia y elasticidad, lo cual lo hace apto para soportar grandes deformaciones y esfuerzos de tensión sin fallar de manera inmediata [11]; además con un tratamiento adecuado de anticorrosivo puede sobre llevar los efectos secundarios que se producen en este material al estar sumergido en agua durante los periodos de inundación.

Finalmente, cabe destacar que las dimensiones de los parales y el anillo metálico son valores supuestos en base al criterio ingenieril, por lo cual pueden variar, dado que no se obtuvieron por medio de cálculos para definir sus medidas.

2.5 Análisis de flotabilidad y estabilidad

2.5.1 Análisis de flotabilidad

El análisis de flotabilidad se llevó a cabo por medio de las áreas de flotación (área del plan, área mínima de flotación y área máxima de flotación), las cuales se encuentran delimitadas por el fondo o plan, calado vacío y calado máximo de la estructura flotante (Ver Tabla XI), respectivamente; los resultados se organizaron en la Tabla XIII.

Tabla XIII CÁLCULO DE LAS ÁREAS DE FLOTACIÓN DE LA ESTRUCTURA FLOTANTE

Áreas de flotación			A (m²)
Área del plan	$A_1 = E_1 \times M_1$	(6)	109,21
Área mínima de flotación	$A_2 = E_2 \times M$	(7)	122,41
Área máxima de flotación	$A_3 = E_3 \times M$	(8)	122,5

Fuente: Autor

Una vez establecidas las áreas de flotación de la estructura flotante, se procedió a determinar el desplazamiento total de la unidad por el peso específico del agua (Ver Tabla XIV), el cual se encuentra comprendido entre el área del plan y el área máxima de flotación; se realizaron dos cálculos de desplazamientos, vacío (peso de la unidad) y útil (carga general) [8]:

Tabla XIV CÁLCULO DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA FLOTANTE

Desplazamientos de la unidad			D (Ton)
Desplazamiento vacío	$D_v = \frac{A_1 + A_2}{2} \times CV$	(9)	28,95
Desplazamiento útil	$D_u = \frac{A_2 + A_3}{2} \times PU$	(10)	91,84
Desplazamientos de la unidad			D (Ton)
Desplazamiento total	$DT = D_v + D_u$	(11)	120,79

Fuente: Autor

Asimismo, se calculó la capacidad transportadora de la estructura flotante (89,04 Ton), la cual se encuentra limitada por el desplazamiento útil de la unidad (D_u) y el desplazamiento útil remanente (D_{du}); este último es la sumatoria de todos los pesos que corresponden a la capacidad de los tanques de almacenamiento (2 Ton), la cantidad de personas (0,5 Ton), equipos y aparejos (0,3 Ton) [8], dichos pesos son especificados en el decreto 2049 de 1956.

Finalmente, se determinó el coeficiente de flotabilidad, entendido como la relación entre la reserva de flotabilidad mínima (RFM) y el desplazamiento total de la unidad por la acción del peso específico del agua (Ver Tabla XIV), siendo el primero el espacio libre entre el área máxima de flotación (Ver Tabla XIII) y la cubierta de la estructura flotante; el resultado de dicha reserva de flotabilidad fue de 61,25 Ton.

Al determinar la reserva de flotabilidad mínima se procedió a calcular el coeficiente de flotabilidad, el cual tuvo un valor del 50,71 %.

2.5.2 Análisis de estabilidad

Para efectuar los diferentes cálculos y el respectivo análisis de estabilidad de la estructura, se tuvo en cuenta la estabilidad estática transversal y longitudinal de la unidad, para lo cual se emplearon las formulas establecidas en el decreto 2049 de 1956 y los cálculos requeridos por la Inspección Fluvial [8]. Es importante aclarar que, los siguientes cálculos se realizaron para las dos situaciones planteadas anteriormente (unidad estando vacía y a plena carga).

➤ Estabilidad estática transversal de la estructura flotante

El cálculo de la estabilidad estática transversal de la unidad se efectuó a partir de los siguientes procedimientos:

- ✓ **Altura del centro de carena (KC):** El centro de carena es el punto de aplicación de la fuerza de empuje en una embarcación, el cual se encuentra ubicado a una altura KC de la quilla (Ver Tabla XV), establecida en el fondo de la unidad. [12]

Tabla XV CÁLCULO DE LA ALTURA DEL CENTRO DE CARENA DE LA UNIDAD

Altura del centro de carena		KC (m)
Unidad estando vacía	$KC_v = \frac{5 \times CV}{6} - \frac{A_2 \times CV}{3 \times A_2}$ (12)	0,125
Unidad a plena carga	$KC_c = \frac{5 \times (CV + PU)}{6} - \frac{A_3 \times (CV + PU)}{3 \times A_3}$ (13)	0,5

Fuente: Autor

- ✓ **Radio metacéntrico transversal (CMO):** es el radio que describe la curvatura de una embarcación al ocurrir un movimiento inicial de balance de la unidad (Ver Tabla XVI), con una inclinación (escora) entre 5° y 7°. [13]

Tabla XVI CÁLCULO DEL RADIO METACÉNTRICO TRANSVERSAL DE LA UNIDAD

Radio metacéntrico transversal		CMO (m)
Unidad estando vacía	$CMO_v = \frac{IT}{V_c} = \frac{\frac{E_2 \times M^3}{12}}{A_2 \times CV}$ (14)	25,521
Unidad a plena carga	$CMO_c = \frac{IT}{V_m} = \frac{\frac{E_3 \times M^3}{12}}{A_3 \times (CV + PU)}$ (15)	6,38

Fuente: Autor

- ✓ **Altura del metacentro desde la quilla (KMO):** Al establecer la altura del centro de carena (Ver Tabla XV) y el radio metacéntrico transversal (Ver Tabla XVI), se procedió a calcular la ubicación del metacentro de la unidad (Ver Tabla XVII), la cual se encuentra determinada por las distancias mencionadas.

Tabla XVII CÁLCULO DE LA ALTURA DEL METACENTRO DESDE LA QUILLA

Altura del metacentro desde la quilla		KMO (m)
Unidad estando vacía	$KMO_v = KC_v + CMO_v$ (16)	25,646
Unidad a plena carga	$KMO_c = KC_c + CMO_c$ (17)	6,88

Fuente: Autor

- ✓ **Altura del centro de gravedad (KG):** El centro de gravedad es el punto de aplicación donde se encuentra concentrado el peso de una embarcación y cada uno de sus componentes [14], ubicado a una altura Kg de la quilla o fondo de la unidad; sin embargo, este punto es desplazado a una altura KG por el peso del agua. Para calcular la altura del centro de gravedad (KG) se tuvo en cuenta el peso de la unidad (desplazamiento vacío), carga general (desplazamiento útil), con sus respectivos centros de masa y momentos verticales (Mv); los cuales se organizaron en la Tabla XVIII.

Tabla XVIII CENTRO DE MASA Y MOMENTO VERTICAL DE LA UNIDAD

Detalle	Carga (Ton)	Y (m)	Mv (Ton-m)
Peso de la unidad	28,953	0,753	21,811
Carga general	91,842	2,941	270,066
DT	120,795	ΣMv	291,876

Fuente: Autor

Al calcular el momento vertical para las dos situaciones planteadas (Ver Tabla XVIII), se procedió a determinar la altura del centro de gravedad sobre la quilla (Kg) y su desplazamiento ocasionado por el peso del agua (KG), tal como se muestra en la Tabla XIX.

Tabla XIX CÁLCULO DE LA ALTURA DEL CENTRO DE GRAVEDAD DE LA UNIDAD

Altura del centro de gravedad		KG (m)
Unidad estando vacía	$Kg_v = \frac{Mv}{Dv}$ (18)	0,753
	$KG_v = Kg_v - CV$ (19)	0,503
Unidad a plena carga	$Kg_c = \frac{\sum Mv}{DT}$ (20)	2,416
	$KG_c = Kg_c - Cm$ (21)	1,416

Fuente: Autor

- ✓ **Altura metacéntrica transversal (GMO):** es la diferencia entre la altura del metacentro desde la quilla

(KMO) (Ver Tabla XVII) y la altura del centro de gravedad (KG) (Ver Tabla XIX) [15]; usualmente este valor se usa como referencia para determinar si una embarcación es estable o no. De acuerdo con lo anterior, se calculó para las dos situaciones planteadas, tal como se evidencia en la Tabla XX.

Tabla XX CÁLCULO DE LA ALTURA METACÉNTRICA TRANSVERSAL DE LA UNIDAD

Altura metacéntrica transversal		GMO (m)
Unidad estando vacía	$GMO_v = KMO_v - KG_v$ (22)	25,143
Unidad a plena carga	$GMO_c = KMO_c - KG_c$ (23)	5,464

Fuente: Autor

➤ **Estabilidad estática longitudinal de la estructura flotante**

El cálculo de la estabilidad estática longitudinal de la unidad se efectuó a partir de los siguientes procedimientos:

- ✓ **Radio metacéntrico longitudinal (CML):** al igual que el transversal, describe el radio de la curvatura de una embarcación (Ver Tabla XXI), con la diferencia que no se realiza al momento de un movimiento inicial de balance, sino de cabeceo, producto del traslado del centro de carena por una inclinación longitudinal. [16]

Tabla XXI CÁLCULO DEL RADIO METACÉNTRICO LONGITUDINAL DE LA UNIDAD

Radio metacéntrico longitudinal		CML (m)
Unidad estando vacía	$CML_v = \frac{IL}{V_c} = \frac{\frac{E_2^3 \times M}{12}}{A_2 \times CV}$ (24)	65,24
Unidad a plena carga	$CML_c = \frac{IL}{V_m} = \frac{\frac{E_3^3 \times M}{12}}{A_3 \times (CV + PU)}$ (25)	16,33

Fuente: Autor

- ✓ **Altura metacéntrica longitudinal (GML):** La altura metacéntrica longitudinal tiene un valor que se aproxima al radio metacéntrico longitudinal (CML) (Ver Tabla XXI), ya que la distancia entre el centro de gravedad (KG) (Ver Tabla XIX) y el centro de carena (KC) (Ver Tabla XV) de una embarcación es muy pequeña en relación con el CML; por lo cual, se tiende a considerar que la altura metacéntrica longitudinal siempre es positiva y que su análisis no es necesario; sin embargo, su cálculo es importante, dado que permite analizar el asiento y la alteración del traslado de un peso en una unidad flotante [17]. Por lo tanto, este valor para las dos situaciones planteadas, se organizó en la Tabla XXII.

Tabla XXII CÁLCULO DE LA ALTURA METACÉNTRICA LONGITUDINAL DE LA UNIDAD

Altura metacéntrica longitudinal		GML (m)
Unidad estando vacía	$GML_v = KC_v + CML_v - KG_v$ (26)	64,862
Unidad a plena carga	$GML_c = KC_c + CML_c - KG_c$ (27)	15,417

Fuente: Autor

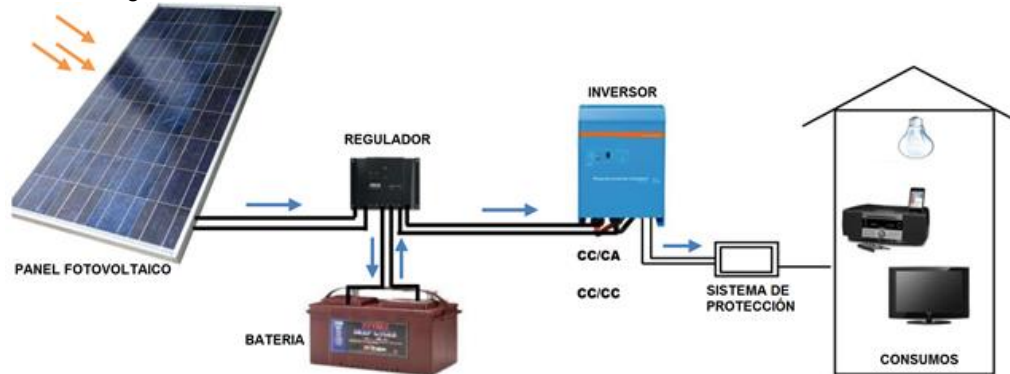
2.6 Propuesta del sistema de servicios básicos

La vivienda flotante no solo garantizará la seguridad de sus habitantes durante un evento de inundación, también proporcionará los servicios básicos durante dicho periodo, por medio de la implementación de energías limpias, que permiten el suministro de energía eléctrica, agua potable y el tratamiento de aguas residuales cuando se incremente el nivel de agua en la zona de estudio.

2.6.1 Suministro de energía

En Colombia la radiación solar es de aproximadamente 4,5 KWh/m²/día [18] y en Puerto López de acuerdo con los mapas realizados por el IDEAM en el 2014, es de 4,5 a 5 KWh/m²/día [19] con un promedio de 5 a 6 horas de sol al día [20]; la cual puede ser transformada en energía eléctrica a través de un sistema fotovoltaico (Ver Fig. 2)

Fig. 2 COMPOSICIÓN DE UNA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA AISLADA



Fuente: García, 2016

La potencia del sistema fotovoltaico depende principalmente de la tecnología empleada para la construcción de las celdas o células solares del panel fotovoltaico; las más empleadas son:

- ✓ **Silicio amorfo:** este tipo de celdas son las más económicas, su costo oscila entre 1,8 y 2,1 euros por vatio pico (€/Wp) y tienen un rendimiento promedio del 4 al 11%; sin embargo, su eficiencia se reduce a largo plazo, son susceptibles a deterioros iniciales y requieren de un mayor coste de materiales y energía. [21]
- ✓ **Silicio monocristalino (m-Si):** su fabricación es más compleja y tienen un costo más elevado que las celdas de silicio amorfo (más de 2,6 €/Wp), pero su rendimiento es de 15 a 21%. Esta tecnología se puede utilizar en paneles para la región Amazónica y Pacífica, dado que con la radiación solar que poseen se puede obtener la potencia instalada. [21]
- ✓ **Silicio policristalino (p-Si):** las celdas solares construidas con esta tecnología tienen un rendimiento del 16% y un costo de 2,2 a 2,6 €/Wp; sin embargo, al ser modulares permiten una mejor ocupación del espacio disponible para su instalación. Las celdas de silicio policristalino se pueden usar en las regiones Andina y Orinoquía, ya que la potencia del sistema se alcanza fácilmente con ciertos rangos de radiación. [21]

2.6.2 Suministro de agua potable

Para evitar que la tubería de agua se rompa cuando la vivienda flotante se eleve, es necesario emplear otro material que facilite la conexión de la vivienda con la acometida de agua potable, como lo son las tuberías reticuladas de polietileno (PEX), la variedad de estas depende principalmente de la reacción química que se lleva a cabo en el proceso de fabricación del polietileno reticulado, comúnmente llamado enlace cruzado (cross-linked); las tuberías obtenidas con este proceso son empleadas en las instalaciones hidráulicas de proyectos residenciales, comerciales o industriales, las cuales son: [22]

- ✓ **Tubería PEX-A:** su fabricación se realiza por medio del método del peróxido o método Engels, donde se produce un enlace mayor al 70% entre las cadenas de polímero; lo cual le otorga a la tubería una mayor resistencia y flexibilidad. [22]
- ✓ **Tubería PEX-B:** fabricado por el método del silano o curado por humedad, donde el enlace producido es mayor al 65%, por lo cual, es menos flexible que la PEX-A, pero más resistente a la presión. [22]
- ✓ **Tubería PEX-C:** producto del método de radiación, el cual consiste en exponer a la tubería a una irradiación electrónica, donde se dividen los enlaces existentes de las cadenas de polímero [23]; el enlace obtenido es mayor al 60% y sus propiedades son similares a la PEX-B, sin embargo, su flexibilidad es más baja. [22]

2.6.3 Tratamiento de aguas residuales

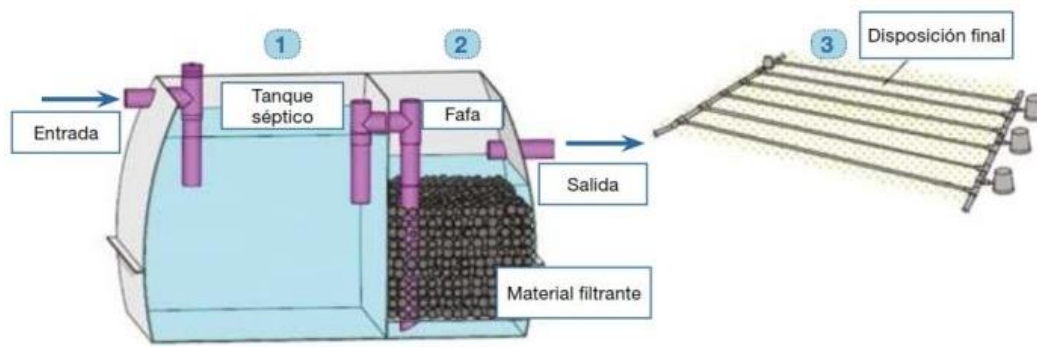
Los principales sistemas para el tratamiento de aguas residuales para viviendas individuales o aisladas que describe el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS son: trampas de grasa, tanque séptico, campo de infiltración, humedades artificiales, filtros intermitentes y sumergidos aireados, lagunas de oxidación y tanques Imhoff [24]. Es importante destacar que, aunque el reglamento

propone diferentes sistemas solo se analizó uno de ellos, dado que la selección se encuentra limitada al espaciamiento de las bodegas de almacenamiento, costos de construcción y mantenimiento; el cual se describe a continuación:

- ✓ **Tanque séptico:** es un tanque prefabricado en polietileno o fibra de vidrio; durante su funcionamiento se realiza un proceso físico y uno biológico, en el primero se separan los sólidos sedimentables (lodos) que existan en las aguas residuales de los flotantes (aceites, grasas) a través de la acción de la gravedad, la capa intermedia entre lodos y flotantes compone al agua clarificada o tratada parcialmente; el segundo proceso tiene lugar en el fondo del tanque, en donde la fracción orgánica de sólidos acumulada experimenta una degradación anaerobia reduciendo así su volumen y produciendo biogás (metano, dióxido de carbono y compuestos con azufre). [25]

Para mejorar el proceso de clarificación de agua, se recomienda instalar un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), el cual es una cámara integrada al tanque séptico, en donde el agua parcialmente tratada pasa de manera ascendente por un material filtrante (estructura plástica o grava) hacia una disposición final (Ver Fig. 3).

Fig. 3 TANQUE SÉPTICO INTEGRADO



Fuente: Depuragua, s.f.

2.7 Presupuesto de la vivienda flotante

A partir de los planos arquitectónicos, estructurales y de instalaciones técnicas de la vivienda, se calculó las cantidades de obra y el análisis de precios unitarios (APU) para cada actividad propuesta para la ejecución de la obra por unidad de medida; además, para la realización de los APU se tuvo en cuenta información de bases de datos de los catálogos de Construdata y Teckne, en sus versiones más recientes.

Adicionalmente, a cada uno de los APU se les calculó los costos por administración (15%), imprevistos (5%), y utilidad (5%), para determinar cada costo total por actividad de construcción. La Tabla XXIII presenta un resumen general del presupuesto de cada actividad general por costo unitario.

Tabla XXIII RESUMEN DEL PRESUPUESTO DE CADA ACTIVIDAD GENERAL POR COSTO UNITARIO

ITEM	ACTIVIDAD	VALOR UNITARIO
1	Preliminares	\$ 37.831
2	Rellenos	\$ 59.552
3	Excavación	\$ 54.897
4	Cimentación	\$ 1.174.278
5	Estructura Metálica	\$ 340.393
6	Estructura en Concreto	\$ 144.161
7	Instalaciones Sanitarias	\$ 3.895.577
8	Aparatos Sanitarios	\$ 2.179.826
9	Instalaciones Eléctricas	\$ 13.579.430
10	Instalaciones Hidráulicas	\$ 323.374
11	Pisos	\$ 117.937
12	Mampostería	\$ 78.315
13	Cubierta	\$ 50.376
14	Cielo Raso	\$ 68.412
15	Pañetes	\$ 19.192
16	Carpintería en Madera	\$ 270.967
17	Enchapes y Accesorios	\$ 225.546
18	Vidrios	\$ 42.769
19	Aseo	\$ 3.550

Fuente: Autor

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Chequeo de derivas

Los desplazamientos horizontales que, por efectos de un sismo suceden entre dos puntos en niveles continuos de una estructura se les conoce como derivas, los cuales pueden generar deformación inelástica y daños de los elementos estructurales y no estructurales, así como dar un efecto de estabilidad global en la estructura o producir pánico en las personas que habitan la edificación.

La deriva máxima se puede calcular a partir de la diferencia entre los desplazamientos horizontales totales máximos del punto en el piso i y los de un punto localizado en el mismo eje vertical en el piso $i-1$ [5], mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta_{max}^i = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (\delta_{tot,j}^i - \delta_{tot,j}^{i-1})^2} \quad (28)$$

Considerando lo anterior y los resultados de la modelación realizada en el software ETABS, se identificaron los desplazamientos (derivas) generados en la vivienda y se verificó que se cumpliera con lo establecido en la NSR-10 (Tabla XXIV).

Tabla XXIV REGISTRO DE DERIVAS OBTENIDAS EN EL SOFTWARE ETABS

Story	U1 - SX	U2 - SY	Deriva	Límite de Deriva	Criterio
Text	m	m	m	m	
Story1	0,0001431	0,0000136	0,0001437	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0001417	0,0000251	0,0001439	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0000193	0,0000253	0,0000318	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0000177	0,0000128	0,0000219	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0001431	0,0000008	0,0001431	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0000163	0,0000007	0,0000163	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0001413	0,0000135	0,0001419	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0000158	0,0000138	0,0000210	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0001400	0,0000288	0,0001429	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0000157	0,0000284	0,0000325	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0000280	0,0000258	0,0000381	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0000297	0,0000127	0,0000323	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0001459	0,0000125	0,0001464	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0001475	0,0000258	0,0001497	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0001431	0,0000012	0,0001431	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0001409	0,0000135	0,0001415	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0001397	0,0000284	0,0001426	0,0275	CUMPLE
Story1	0,0000505	0,0000284	0,0000579	0,0275	CUMPLE

Fuente: Autor

3.2. Deflexión de la viga

Se verificó que la deflexión producida por la carga de servicio que soporta la viga sea menor que la deflexión máxima permisible, por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta_{máx} = \frac{5wL^4}{384EI} \quad (29)$$

Donde,

$\Delta_{máx}$ es la deflexión de la viga

w es la carga de servicio de la viga

L es la longitud de la viga

EI es la rigidez de la viga

3.2.1 Carga de servicio

$$\Delta_{máx} = \frac{5(11,195kg/cm)(373cm)^4}{384\left(\frac{2040000kg}{cm^2}\right)(15713,9cm^4)} = 0,088 \text{ cm}$$

El valor de la deflexión máxima permisible se estableció con la siguiente ecuación:

$$\Delta_{permitida} = \frac{L}{360} \quad (30)$$

$$\Delta_{permitida} = \frac{373cm}{360} = 1,04 \text{ cm}$$

$$\Delta_{permitida} = 1,04 \text{ cm}$$

Donde,

$\Delta_{permitida}$ es la deflexión máxima permisible

L es la longitud de la viga

Finalmente, se comprobó que la deflexión generada por la carga de servicio no sobrepasara el valor máximo de la deflexión permitida.

$$\Delta_{m\acute{a}x} < \Delta_{permitida} \quad (31)$$

$$0,088 \text{ cm} < 1,05 \text{ cm} \rightarrow \text{CUMPLE}$$

3.3. Diseño de la estructura flotante

Las dimensiones de los elementos de la estructura flotante se obtuvieron por medio de las tablas especificadas en el decreto 2049 de 1956, las cuales se encontraban limitadas por la eslora (14 m), el puntal costado (1,5 m) y la separación entre cuadernas (0,4 m); con dichas tablas se definió un espesor mínimo para cada una de las planchas y se estableció el tipo de lámina, ángulo y platina con sus respectivas dimensiones (Ver Tabla XXV).

Tabla XXV DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA FLOTANTE

Detalle	Elemento	Dimensión
Platina	Cuadernas	3" X ¼"
	Mamparo de división	3" X ¼"
Ángulo L.D	Esquinas superiores	3" X 3" X ¼"
	Cuadernas	2" X 2" X ¼"
Lámina H.R.	Fondo	1/8" X 1,2 m X 6 m
	Pantoques	1/8" X 1,2 m X 6 m
	Costados	3/16" X 1,2 m X 6 m
	Cubierta	3/16" X 1,2 m X 6 m
	Mamparos de división	3/16" X 1,2 m X 6 m

Fuente: Autor

Las dimensiones seleccionadas para cada uno de los elementos se realizaron en base a las siguientes consideraciones:

- ✓ Los ángulos esquineros (3" X 3" X ¼") tienen una dimensión mayor a los ángulos de refuerzos de las cuadernas (2" X 2" X ¼"), dado que estos no solo se encargan de unir la lámina de la cubierta con la de costado, sino que también deben soportar y distribuir los esfuerzos de una lámina a otra.
- ✓ El espesor de la lámina del fondo y de los pantoques (1/4") es mayor a los otros elementos (3/16"), ya que deben soportar el peso de toda la estructura y sobre estos se apoya el mismo cada vez que la vivienda flotante desciende después de que ocurra un evento de inundación.

3.4. Sistema pilotado o de parales

Para el sistema pilotado o de parales se propusieron las dimensiones de cada uno de los parales, con el fin de llevar a cabo el diseño de la placa base y su respectiva cimentación, para lo cual se tuvo en cuenta un estudio geotécnico que se realizó en el barrio Santander del municipio de Puerto López.

3.4.1 Diseño de la placa base

Para efectuar el diseño de la placa, se estableció que el área de la placa (A1) cubre toda el área del pedestal de concreto de la cimentación (A2); para lo cual, se implementó una placa de 400 X 400 X 13 mm, con el fin de garantizar la disponibilidad de espacio para la ubicación de los pernos.

Al establecer las dimensiones de la placa, se procedió a verificar la resistencia al contacto del concreto de la cimentación ($\phi_c P_p$), esta debe ser mayor a la carga total que trasmite el paral a la placa base ($P_u = 176 \text{ KN}$); tal como se evidencia a continuación:

$$\phi_c P_p = \phi_c 0,85 f'_c A_1 \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad (32)$$

$$\phi_c P_p = 0,65 \times (0,85 \times 21 \times 10^3 \text{ KPa}) \times (0,4 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}) \times (1)$$

$$\phi_c P_p = 1856,4 \text{ KN} > 176 \text{ KN} \rightarrow \text{OK}$$

Después de verificar la resistencia al contacto del concreto de la cimentación, se procedió a determinar la resistencia de diseño de la platina, la cual se encuentra limitada por un factor de resistencia (ϕ) de 0.9, el área bruta del elemento (A_g) y el esfuerzo de fluencia mínimo del acero usado ($F_y = 345 \text{ MPa}$).

$$\phi P_p = \phi A_g F_y \quad (33)$$

$$\phi P_p = 0,9 \times (0,4 \text{ m} \times 0,013 \text{ m}) \times (345 \times 10^3 \text{ KPa})$$

$$\phi P_p = 1614,6 \text{ KN}$$

Posteriormente, se definió la cantidad necesario de pernos para transmitir los 1614,6 KN que puede soportar la platina; para ello se usaron pernos A490-N de 7/8", los cuales tienen una resistencia de 265,34 KN en doble corte y 226,44 KN en tensión.

Por lo cual, se tiene que la placa base cuenta con 8 pernos A490-N de 7/8", estos de acuerdo con los numerales F.2.3.10.3.3 y F.2.10.3.5 de la NSR-10 deben tener una separación entre perforaciones (S) de 66,6 mm a 150 mm y una distancia al borde (l) de 25,4 mm y 150 mm.

En base a lo anterior, se calculó la resistencia al aplastamiento de cada perno, con los datos registrados en la Tabla XXVI.

Tabla XXVI DATOS PARA EL DISEÑO POR APLASTAMIENTO DE LA PLACA PARA CADA PARAL

Datos para diseño por aplastamiento	
Tipo de perno	A490-N
Diámetro del perno (in)	7/8
Diámetro del perno (m)	0,0222
Número de pernos - n	8
Perforación estándar (m)	0,0238
Espaciamento entre pernos (m)	0,09
Distancia al borde (m)	0,065
Distancia libre - Lc (m)	0,0531
Espesor de la parte conectada - t (m)	0,013
Resistencia a la tensión - Fu (MPa)	428

Fuente: Autor

$$R_n = (1,2 L_c t F_u) \leq (2,4 d t F_u) \quad (34)$$

$$R_n = (1,2 \times 0,0531 \text{ m} \times 0,013 \text{ m} \times 428 \times 10^3 \text{ KN}) \leq (2,4 \times 0,0222 \text{ m} \times 0,013 \text{ m} \times 428 \times 10^3 \text{ KN})$$

$$R_n = 354,54 \text{ KN} \leq 296,45 \text{ KN}$$

Para el cálculo de la resistencia al aplastamiento de la placa base de cada paral con la ecuación (35) se tuvo en cuenta la cantidad de pernos, el factor de resistencia de 0,75 y la resistencia de menor valor de cada perno, tal como se muestra a continuación:

$$\phi R_n = \phi \times n \times R_n \quad (35)$$

$$\phi R_n = 0,75 \times 8 \times 296,45 \text{ KN}$$

$$\phi R_n = 1778,7 \text{ KN}$$

3.4.2 Diseño de zapata con carga axial

Teniendo en cuenta que, el pedestal de concreto de la cimentación tiene un área igual a la placa base de los paraleles (400 X 400 X 13mm), se procedió a determinar las dimensiones de la zapata, tal como se evidencia:

- Distancia desde la fibra extrema en compresión al centroide del refuerzo longitudinal:

$$d = h - \text{Recubrimiento} \quad (36)$$

$$d = 40\text{cm} - 7,5\text{cm} = 32,5\text{cm}$$

➤ Esfuerzo neto:

$$\sigma_{na} = \sigma_{adm} - \gamma_c d - [\gamma_s(D_f - d)] \quad (37)$$

$$\sigma_{na} = 100\text{KN}/\text{m}^2 - (24\text{KN}/\text{m}^3)(0,325\text{m}) - [15\text{KN}/\text{m}^3(1,10\text{m} - 0,325\text{m})]$$

$$\sigma_{na} = 80,575 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

➤ El área de la zapata será la relación entre la carga de servicio y el esfuerzo neto del suelo:

$$\text{Área} = \frac{120\text{KN} + 20\text{KN}}{\frac{80,575\text{KN}}{\text{m}^2}} \cong 1,7 \text{ m}^2$$

➤ Ancho B y largo de la zapata:

$$B = L = \sqrt{1,7} \cong 1,3 \text{ m}$$

3.5. Análisis de flotabilidad

La flotabilidad de una embarcación al igual que cualquier objeto se puede describir o explicar por medio del principio de Arquímedes, el cual indica que un objeto sumergido en un determinado fluido experimenta una fuerza de empuje igual al peso del volumen del fluido desalojado [26], que en este caso es el agua producto de un evento de inundación.

En la Tabla XXVII se puede observar que el peso de las dos estructuras (flotante y habitable) es menor al peso del agua desalojada en los dos desplazamientos considerados; por lo tanto, se tiene que la vivienda flotante posee una capacidad de flotación positiva, es decir que flota sobre la superficie del agua.

Tabla XXVII PESO DE LA ESTRUCTURA FLOTANTE Y HABITABLE CON SUS RESPECTIVOS DESPLAZAMIENTOS DE AGUA

Estructura	Peso de la estructura (Ton)	Desplazamiento	Peso de agua desalojada (Ton)
Flotante	20,26	Vacío	28,95
Habitable	42,63	Capacidad Transportadora	89,04

Fuente: Autor

Es importante aclarar que los pesos de estas estructuras pueden variar de acuerdo con los materiales que se deseen emplear para una futura construcción, los pesos que se mostraron (Ver Tabla XXVII) son del presupuesto que se realizó. Además, en caso de que los pesos de las dos estructuras sean iguales o superen el peso del agua desalojada, la unidad flotante cuenta con una reserva de flotabilidad, que es el volumen existente entre la superficie de flotación y la cubierta de la estructura flotante [27]; el cual garantiza que la vivienda flotante tenga una capacidad de flotación positiva, incluso en condiciones de mal tiempo; esto se comprobó por medio del coeficiente de flotabilidad (Ver numeral 2.5.1), el cual fue superior al 50%, demostrando que la vivienda flotante puede flotar incluso en condiciones desfavorables.

3.6. Análisis de estabilidad

3.6.1 Estabilidad estática transversal

La estabilidad estática transversal es la capacidad que posee toda embarcación para regresar a su posición inicial después de producirse una inclinación que ocasiona que uno de los costados de la unidad emerja y el otro se sumerja, este movimiento usualmente se denomina balanceo. [15]

En la Tabla XXVIII se tiene que la vivienda flotante posee un equilibrio estable, dado que la altura metacéntrica transversal (GMO) es mayor a cero en las dos situaciones analizadas y el metacentro se encuentra ubicado por encima del centro de gravedad; esto garantiza que en caso de que se presente cierto grado de inclinación o escora, la ubicación del par de estabilidad (KMO y KG) permitirá que la vivienda flotante regrese a su posición original.

Tabla XXVIII ESTABILIDAD ESTÁTICA TRANSVERSAL

Situación analizada	Altura del metacentro desde la quilla (KMO) (m)	Altura del centro de gravedad (KG) (m)	Altura metacéntrica transversal (GMO) (m)
Unidad estando vacía	25,65	0,503	25,14
Unidad a plena carga	6,88	1,464	5,46

Fuente: Autor

Adicionalmente, se puede analizar que:

- ✓ La unidad estando vacía, es decir sin tener en cuenta la estructura habitable; es una embarcación dura o rígida de estabilidad, ya que la altura metacéntrica obtenida para esta situación es considerablemente alta (25,14 m), lo cual ocasiona que la unidad se balancee de manera rápida. [27]
- ✓ La unidad a plena a carga (vivienda flotante) es una embarcación blanda de estabilidad, dado que la altura metacéntrica transversal es baja (5,46 m); esto indica que los balances que se puedan presentar son amplios y de larga duración, lo cual conlleva a que la unidad se demore en volver a su posición inicial [15]; sin embargo, es importante aclarar que el sistema de parales que posee la vivienda flotante evita que se produzcan grandes grados de inclinación, por lo tanto, los periodos de duración y la amplitud del balanceo serán menores.

3.6.2 Estabilidad estática longitudinal

La estabilidad estática longitudinal es la capacidad que tiene una embarcación para retomar su posición inicial después de una determinada inclinación; esta se diferencia de la transversal, dado que las inclinaciones se generan de proa a popa o viceversa y su medición se realiza por medio de la variación de calados entre la proa y popa; dicho movimiento se denomina cabeceo o asiento. [27]

En la Tabla XXIX se puede apreciar que la unidad en las dos situaciones analizadas es dura o rígida de estabilidad y tiene un equilibrio estable, dado que la altura metacéntrica registrada en ambas situaciones es considerablemente alta y el metacentro tanto de la estructura flotante (unidad estando vacía) como de la vivienda flotante (unidad a plena carga) se encuentran por encima del centro de gravedad.

Tabla XXIX ESTABILIDAD ESTÁTICA LONGITUDINAL

Situación analizada	Altura del metacentro desde la quilla (KC+CML) (m)	Altura del centro de gravedad (KG) (m)	Altura metacéntrica longitudinal (GML) (m)
Unidad estando vacía	65,35	0,503	64,86
Unidad a plena carga	16,83	1,464	15,42

Fuente: Autor

3.7. Propuesta del sistema de servicios básicos

Durante los eventos de inundación los habitantes de la zona afectada están expuestos a riesgos eléctricos, tales como, electrocución, incendios, explosiones o quemaduras por choque eléctrico e incluso la muerte [28], esto debido a que las sales minerales que poseen los diferentes cuerpos hídricos y el agua tratada, facilitan el paso de una corriente eléctrica [29]. Por otra parte, el sistema hidrosanitario se puede ver interrumpido por posibles afectaciones en la red de acueducto y alcantarillado durante dicho periodo. En base a lo anterior, se investigaron diferentes alternativas que proporcionen los servicios básicos en la vivienda flotante, de las cuales se obtuvo lo siguiente:

- ✓ **Sistema solar fotovoltaico:** donde el subsistema de generación está conformado por paneles solares de silicio policristalino, dado que con la radiación promedio registrada en la región se alcanza rápidamente la potencia necesaria para el funcionamiento de todo el sistema; además al estar fabricado de forma modular permite ocupar de manera eficiente el espacio disponible para su instalación.
- ✓ **Tubería PEX-A:** o tubería flexible de polímero altamente reticulado, la cual posee un alto grado de flexibilidad y resistencia en comparación con las otras tuberías PEX analizadas; además puede soportar alargamientos superiores a 400% sin romperse [30].
- ✓ **Sistema séptico integrado:** es un tanque prefabricado en polietileno, el cual cuenta con dos divisiones internas compuestas por un tanque séptico y un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA); este sistema permite el tratamiento de las aguas residuales de la vivienda, separando los sólidos sedimentables de las grasas y aceites, que por medio del filtro se mejorará el proceso de clarificación de agua.

3.8. Presupuesto de la vivienda flotante

De acuerdo a los análisis de precios unitarios y las cantidades de obra obtenidas de cada una las actividades propuestas para la ejecución del proyecto, se realizó el presupuesto total de la obra, es decir la estimación aproximada del costo de la vivienda flotante, el cual fue de \$216.198.229.

4. CONCLUSIONES

- Con el diseño de los elementos estructurales del sistema de pórtico en acero se comprobó que los estados límites de resistencia de diseño fueron mayores a los requeridos; además, ante fuerzas horizontales como las de un sismo, la vivienda obedece con lo establecido en la NSR-10, donde los desplazamientos máximos que se obtienen en una estructura tanto en dirección "X" como en "Y" corresponden al 1% de la altura del piso estudiado; es decir que los desplazamientos registrados deben ser menores a 0,0275 m; los cuales cumplen satisfactoriamente, ya que la deriva máxima registrada fue de 0,0001 m; por lo tanto se pueden reducir las dimensiones de los elementos estructurales para disminuir la rigidez de la estructura.
- La estructura flotante tiene forma de barcaza con 14 m de eslora por 8,75 m de manga y 1,5 m de costado, dado que esta garantiza la estabilidad y flotabilidad de toda la estructura; igualmente con las dimensiones mencionadas cumple cada una de las condiciones establecidas en el decreto 2049 de 1956 y las modificaciones realizadas por la resolución 1918 de 2015. Además de acuerdo con la normativa mencionada se estableció que la estructura está conformada por láminas H.R. de 1/4" (fondo y pantoques) y 3/16" (costados, cubierta y mamparos de división) con platinas de 3" X 1/4" y ángulos de 3" X 3" X 1/4" y 2" X 2" X 1/4" como refuerzos de los elementos que componen la base flotante.
- El sistema de anclaje de la estructura flotante seleccionado fue el sistema de parales dado que evita movimientos horizontales de la vivienda pero permite desplazamientos verticales de esta durante el evento de inundación, además controla el balanceo de la estructura cada vez que aumente el nivel de agua; sin embargo, en caso de que no se quieran restringir los desplazamientos horizontales, es decir que no se tenga en cuenta el sistema de parales; es necesario aumentar la altura metacéntrica transversal de la unidad a plena carga reduciendo la altura del centro de gravedad, con el fin de que el periodo de duración y la amplitud del balanceo se reduzcan; o en su defecto realizar un análisis de los periodos de balance que pueda tener la vivienda flotante, para verificar que esta pueda navegar de manera segura y estable.
- Desde un aspecto técnico, la estabilidad de la vivienda cumple con los criterios específicos para flotar en el agua, ya que posee una capacidad de flotación positiva ($CF > 50\%$) y una condición de equilibrio estable ($GM > 0$); asimismo se tiene que, sin un sistema de anclaje la vivienda se encuentra expuesta a balanceos amplios y de larga duración, que no producen daños estructurales ni incomodidad a las personas a bordo.
- Para los servicios básicos se propusieron sistemas alternativos que se acomodaran a las características constructivas de la estructura flotante y dieran una solución eficiente a las necesidades de los habitantes de la vivienda. Los sistemas planteados son una opción sencilla de mantener los servicios básicos en la vivienda durante los eventos de inundación, además no requieren de grandes superficies para su instalación.
- El presupuesto total de la construcción de la vivienda flotante evidencia que implementar un sistema constructivo con nuevas tecnologías ecológicas no significa que la ejecución de esta sea económica, puesto que encontrar un equilibrio entre lo nuevo, económico y ecológico tiene como resultado un trabajo muy arduo, ya que la alternativa de un producto nuevo resulta más costosa por los diferentes procesos de instalación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por permitirnos culminar con éxito este trabajo, por ser fuente de fe y sabiduría en el transcurso de nuestra formación profesional.

A nuestra familia por ser el motor de motivación en nuestras vidas, gracias por cada oración y consejo, por enseñarnos a ser mujeres íntegras, independientes y responsables.

A nuestro director de tesis, Ingeniero Emiro Lozano, por su compromiso, disponibilidad, paciencia y orientación durante la elaboración de este trabajo de grado, permitiendo que nos desarrolláramos profesionalmente.

A la Universidad Santo Tomás por brindarnos un espacio para adquirir conocimientos y prepararnos como profesionales íntegras.

A nuestros amigos por su paciencia, ánimo, compañía e ideas en las diferentes etapas de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] IDEAM, «Informe hidrológico 31 de Mayo,» Bogotá D.C., 2018.
- [2] Alcaldía de Puerto López, 5 Enero 2019. [En línea]. Available: <http://www.puertolopez-meta.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>. [Último acceso: 14 Abril 2019].
- [3] CORMACARENA, Plan Ambiental 2006 - 2018, Puerto López, 2006.
- [4] Secretaría de planeación, Plan Básico de Ordenamiento Territorial, Puerto López, 2018.
- [5] R. C. S. R. NSR-10, Título A: Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente, Bogotá D.C., 2010.
- [6] D. F. Venegas, «Elaboración de cálculos, estudio de vulnerabilidad sísmica de los tanques elevados (Abel Rey, Julio Florez y Villamodielia) en el área urbana del municipio de Puerto López - Meta,» Puerto López, 2018.
- [7] R. C. S. R. NSR-10, Título B: Cargas, Bogotá D.C., 2010.
- [8] Ministerio de Transporte, Normas para la Construcción, Inspección y Clasificación de las Embarcaciones Fluviales, Bogotá D.C., 1956.
- [9] ITP, Pantalanes flotantes, Santa Perpetua de Mogoda.
- [10] S. Molina y A. Wlaker, Diseño y desarrollo de una plataforma flotante adecuada para la construcción de una vivienda rural unifamiliar para población de bajos recursos para sobrellevar las inundaciones aluviales futuras en las zonas críticas de la depresión Momposina, Medellín, 2010.
- [11] P. V. Colimba y F. I. Choca, Diseño estructural de un edificio de 4 pisos en acero para proyecto de vivienda masivo, Quito, 2016.
- [12] B. Guerrero, Equilibrio de los cuerpos flotantes, Valparaíso, Chile, 2011.
- [13] A. Cavaller, Menorquín Yacht 110, Cartagena, 2007.
- [14] A. Granda, Modificación de un buque pesquero 287.4 Ton. de desplazamiento para cumplir con las normas de estabilidad, Lima, Perú, 2009.
- [15] A. Gudmundsson, Prácticas de seguridad relativas a la estabilidad de buques pesqueros pequeños, Roma: FAO, 2009.
- [16] J. Olivella, Teoría del buque: Estabilidad, varada e inundación, Barcelona: Edicions UPC, 1996.
- [17] J. Olivella, Teoría del buque: Flotabilidad y estabilidad, Barcelona: Edicions UPC, 2013.
- [18] C. A. Toledo Arias, Evaluación de la energía solar fotovoltaica como solución a la dependencia energética de zonas rurales de Colombia, Cartagena, 2013.
- [19] IDEAM, «Atlas Interactivo - Radiación IDEAM,» 2014. [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/RadiacionSolar13.pdf>. [Último acceso: 22 Octubre 2019].
- [20] IDEAM, «Atlas Interactivo - Radiación IDEAM,» 2014. [En línea]. Available: http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Brillo_Solar_13.pdf. [Último acceso: 22 Octubre 2019].
- [21] J. Gómez, J. Murcia y I. Cabeza, La energía solar fotovoltaica en Colombia: Potenciales, Antecedentes y Perspectivas, Bogotá D.C., 2018.
- [22] S. R. G., «Tuberías PEX,» *TODO FERRETERÍA*, n° 79, pp. 50-55, 2018.
- [23] IWISS, «PROS & CONS DE LA TUBERÍA DE PEX-A, PEX-B, PEX-C,» IWISS, 03 Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://iwiss.com/es/proscons-of-pex-a-pex-b-pex-c-tubing/>. [Último acceso: 23 Octubre 2019].
- [24] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, RAS 2000 TÍTULO E - Tratamiento de Aguas Residuales, Bogotá D.C., 2000.
- [25] Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos, Propuesta de reglamento técnico salvadoreño para el diseño y construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario para la zona rural, El Salvador: Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica, 2015.
- [26] L. V. Terán, «Principio de Arquímedes,» *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo Escuela Preparatoria No. 4 Vida Científica*, vol. 2, n° 3, 2014.
- [27] Bernandino, «Escuela Náutica Baleares,» [En línea]. Available: https://www.estudiosonavegas.com/images/Archivos/PY/PY_Seguridad/SEGURIDAD%20PY_Bernardino.doc. [Último acceso: 11 Septiembre 2019].
- [28] Universidad Politécnica de Madrid, «Riesgo eléctrico bajo control,» UPM, Madrid, 2006.
- [29] Universidad de Jaén, «Análisis de aguas,» UJA, Jaén, Andalucía, 2010.
- [30] REHAU, «PEXA VS PEXB, COBRE AND HOPE,» [En línea]. Available: <https://www.rehau.com/mx-es/construccion/municipex/pexa-vs-pexb-y-cobre>. [Último acceso: 23 Octubre 2019].
- [31] L. V. Terán, «Principio de Arquímedes,» *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo Escuela Preparatoria No. 4 Vida Científica*, vol. 2, n° 3, 2014.