

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

# MEMORIA

---

## INVESTIGACIONES EN INGENIERÍA

### Nº 24

FACULTAD DE INGENIERÍA



# MEMORIA

*Investigaciones en Ingeniería*

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

**Núm. 24**

**(2023)**

---

## *Sumario*

*Págs.*

### **Editorial – Una revista para Uruguay y el mundo.**

Rafael Sotelo

**1**

### **Planificación del sistema de ventilación y diseño 3D a largo plazo con el software 3D ventsim, caso Mina Santander – Glencore**

*Planning of the ventilation system and long-term 3D design with the 3D ventsim software, case Santander – Glencore Mine*

V. A. Ponce Estrada, E. J. Huaraya Manzano

**2-12**

### **Desarrollo de Sistema de Aislamiento Sísmico de Bajo Costo para Viviendas de Albañilería de 01 a 02 niveles**

*Development of a Low-Cost Seismic Isolation System for Masonry Housing of 01 to 02 levels*

Y. Carrera, E. Simbort

**13–36**

### **Estimation of the Diffused Solar Irradiation on the Tilted Plane of Photovoltaic Solar Panels**

*Estimación de la Irradiación Solar Difusa en el Plano Inclinado de Paneles Solares Fotovoltaicos*

M. Uzair, A. A. Naqvi, S. U. H. Kazmi

**37-52**

### **Identificación de áreas de mejora para evitar retrasos en proyectos de construcción en Perú**

*Identification of areas for improvement to avoid delays in construction projects in Peru*

H. A. Ccama Condori, M. K. Herrera Quispe, L. V. Panca Humpiri

**53–68**

**Utilization of Solar Energy for Cooling Applications: a Review**

*Utilización de la energía solar para aplicaciones de enfriamiento: una revisión*

A. Shezad, M. Uzair

**69-91**

**Material Modelling and Failure Study of Different Fiber Reinforced Composites for Pressure Vessel**

*Modelado de materiales y estudio de fallas de diferentes compuestos reforzados con fibra para recipientes a presión*

J. Jadoon, A. Shazad, M. Uzair, M. Muzammil

**92-104**

**Sobre la especificación y verificación del patrón de programación paralela PCR en TLA+**

*On the specification and verification of the PCR parallel programming pattern in TLA+*

J. E. Solsona

**105-116**

**In defense of extreme database-centric architecture**

*En defensa de una arquitectura extrema centrada en la base de datos*

A. Vicente

**117-128**

**A Model-Driven Analysis of Mumblewimble Security Properties and its Protocol Implementations**

*Un Análisis Basado en Modelos de las Propiedades de Seguridad de Mumblewimble y las Implementaciones del Protocolo*

A. Silveira, G. Betarte, M. Cristiá, C. Luna

**129-142**

**Estrés abiótico en clima neotropical influencia la producción de pigmentos, capacidad antioxidante y expresión de desórdenes fisiológicos en manzanas.**

*Abiotic stress in neotropical climate influences pigment production, antioxidant capacity and expression of physiological disorders in apples.*

V. Severino

**143-155**

**Sistema de monitoreo y control de cultivo indoor de cannabis**

*Monitoring and control system for an indoor cannabis cultivation*

C. Menoni, D. Alonso, F. Saravia, N. Pérez, L. Steinfeld

**156-171**

**Evaluación de la probabilidad de falla de árboles urbanos usando tecnologías no destructivas**

*Urban tree risk assessment using non-destructive technologies*

A. P. Coelho-Duarte, O. Vallejos-Barra, M. Ponce-Donoso

**171-187**

**Lista de Autores – Memoria Investigaciones en Ingeniería**

**188**

**Lista de Revisores – Memoria Investigaciones en Ingeniería**

**189**

## **Editorial – Una revista para Uruguay y el mundo.**

Nos encontramos en la edición 24 de la revista de investigación en ingeniería editada por la Universidad de Montevideo, Memoria Investigaciones en Ingeniería. Desde su primer número en el año 2000, la revista ha experimentado un crecimiento constante. Ha logrado ser incluida en varios catálogos destacados, entre ellos Latindex, cumpliendo con las 38 características requeridas. Además, se encuentra indexada en el Directory of Open Access Journals (DOAJ) y en Clarivate Web of Science (WoS), específicamente en el Emerging Sources Citation Index (ESCI).

En este número presentamos seis artículos que provienen de los trabajos premiados en distintas categorías del concurso de tesis de postgrado en Ingeniería y del concurso de proyectos de fin de carrera en Ingeniería de la Academia Nacional de Ingeniería de Uruguay (ANIU). Los trabajos presentados son resúmenes de las respectivas tesis o trabajos final de carrera. Los autores son de universidades uruguayas; en un caso hay un coautor de Argentina. Estos trabajos abordan temas de interés en una amplia gama de áreas de la Ingeniería. Entre otros temas se tratan el desarrollo de sofisticadas técnicas de programación de microprocesadores, la criptografía, la arquitectura de aplicaciones centrada en base de datos, y el cultivo de manzanas ante el cambio climático.

Además de los antedichos trabajos premiados por ANIU publicamos seis artículos a partir de envíos regulares. Se incluyen tres enviados desde Pakistán, y tres desde Perú. Estos artículos abordan temas de minería, desarrollo de viviendas de aislamiento sísmico de bajo costo, paneles fotovoltaicos, la utilización de la energía solar para aplicaciones de enfriamiento, y técnicas de gerenciamiento de procesos en la construcción para evitar retrasos.

Como es habitual, los revisores que han colaborado en este número de Memoria Investigaciones en Ingeniería provienen de distintos países de Iberoamérica, y fuera de la región, como Reino Unido, Nigeria o Nueva Zelanda.

Esta revista se enorgullece de su dedicación a la publicación de trabajos de investigación e innovación en el campo de la ingeniería y la tecnología. Nuestro objetivo es servir como una plataforma invaluable para investigadores y profesionales de Iberoamérica, brindando un espacio de difusión para sus contribuciones y logros destacados.

Una vez más la Lic. Valentina Morandi y M.Sc. Ing. Fernando Hernández, del equipo editorial, realizan un invaluable aporte. Envío mi agradecimiento a ellos y a los revisores que participaron para este número.

Dr. Ing. Rafael Sotelo  
Editor en Jefe  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de Montevideo**

# Planificación del sistema de ventilación y diseño 3D a largo plazo con el software 3D ventsim, caso Mina Santander – Glencore

*Planning of the ventilation system and long-term 3D design with the 3D ventsim software, case Santander – Glencore Mine*

*Planejamento do sistema de ventilação e projeto 3D de longo prazo com o software 3D ventsim, caso Mina Santander – Glencore*

Victor A. Ponce Estrada <sup>1</sup>, Elvis. J. Huaraya Manzano <sup>2</sup>

Recibido: 22/05/2022

Aceptado: 27/06/2022

**Resumen.** - En el país, uno de los mayores retos de la minería subterránea es el abastecimiento del flujo de aire requerido en los frentes de trabajo de acuerdo con el D.S. 024-2016-EM y su modificatoria D.S. 023-2017-EM. En la unidad minera Santander, Glencore, la ventilación es forzada debido a la depresión que ejercen los tres ventiladores principales, 100k cfm, 160 cfm y 120k cfm; ubicados en la superficie de la mina. El requerimiento de aire limpio en esta unidad minera es de 421,940 cfm, pero el ingreso de aire limpio es de 431,145 cfm y la salida es de 432,531 cfm, implicando una cobertura de 102%.

Para cumplir, de manera transitoria, con el requerimiento de aire proyectado a largo plazo se realiza una planificación a mediano plazo; para solventar esta deficiencia de planificación, se aplica el software 3D Ventsim que calibrado al 90% la simulación del sistema de ventilación simula escenarios confiables.

En conclusión, la planificación de un sistema de ventilación con el programa de diseño Ventsim permite cumplir con el aire requerido a largo plazo y realizar una evaluación detallada del comportamiento del sistema de ventilación a largo plazo.

**Palabras clave:** Software 3D Ventsim, planificación, largo plazo, Mina Santander – Glencore.

**Summary.** - In the country, one of the biggest challenges of underground mining is the supply of the air flow required in the work fronts according to D.S. 023-2016-EM and its amendment D.S. 024-2017-EM. In the Santander mining unit, Glencore, ventilation is forced due to the depression exerted by the three main fans, 100k cfm, 160 cfm and 120k cfm; located on the surface of the mine. The clean air requirement at this mining unit is 421,940 cfm, but the clean air inlet is 431,145 cfm and the outlet is 432,531 cfm, implying 102% coverage.

*In order to temporarily meet the projected long-term air requirement, medium-term planning is*

---

<sup>1</sup> Doctorado de Ciencias Ambientales; Magister en Gestión Integrada en Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente; Ingeniero de Minas, victoradrian\_2@hotmail.com, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7156-1898>

<sup>2</sup> Ingeniero de Minas, huaraya.e.j@gmail.com, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú  
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0000-3003-0006>

carried out; To solve this planning deficiency, the 3D Ventsim software is applied, which, calibrated at 90%, simulates the simulation of the ventilation system in reliable scenarios.

In conclusion, the planning of a ventilation system with the Ventsim design program allows to comply with the required air in the long term and to carry out a detailed evaluation of the behavior of the ventilation system in the long term.

**Keywords:** Ventsim 3D software; planning; long term, Santander – Glencore Mine.

**Resumo.** - No país, um dos maiores desafios da mineração subterrânea é o suprimento da vazão de ar necessária nas frentes de trabalho conforme D.S. 024-2016-EM e sua alteração D.S. 023-2017-EM. Na unidade de mineração do Santander, Glencore, a ventilação é forçada devido à depressão exercida pelos três ventiladores principais, 100k cfm, 160 cfm e 120k cfm; localizado na superfície da mina. A necessidade de ar limpo nesta unidade de mineração é de 421.940 cfm, mas a entrada de ar limpo é de 431.145 cfm e a saída é de 432.531 cfm, o que implica 102% de cobertura.

Para atender temporariamente à necessidade de ar projetada a longo prazo, é realizado um planejamento de médio prazo; Para solucionar essa deficiência de planejamento, é aplicado o software 3D VentSim que, calibrado a 90%, simula o sistema de ventilação em cenários confiáveis.

Em conclusão, o planejamento de um sistema de ventilação com o programa de projeto Ventsim permite atender o ar necessário a longo prazo e realizar uma avaliação detalhada do comportamento do sistema de ventilação a longo prazo.

**Palavras-chave:** Software 3D Ventsim, planejamento, longo prazo, Santander Mine – Glencore.

**1. Introducción.** - En una mina subterránea, la correcta distribución y cumplimiento de cobertura de aire limpio en los frentes de trabajo es vital en la operación, ya que incide en la salud del personal y la producción, en este sentido el D.S. 024–2016-EM y su modificatoria D.S. 023-2017-EM establece que el titular de la actividad minera es el responsable del suministro de aire limpio en los frentes de trabajo de acuerdo con el requerimiento del personal y equipo. La ventilación de una mina subterránea implica controlar y dirigir el aire limpio a través de las excavaciones subterráneas, sea por ventilación natural o mecánico; por ello, en una unidad minera se debe tener como objetivo básico proveer una atmosfera saludable a todo el personal del interior de la mina, además es relevante tener en cuenta el costo de energía de la ventilación, en vista que representa del 25% al 40% del costo total energético, así como el costo de la ingeniería del circuito principal de ventilación, costos que dependen del planeamiento idóneo que se realice, en vista que una adecuada planificación del circuito de acuerdo a la explotación y tiempo de vida de la mina se evitará costos de reingeniería, y a su vez, cumplir con el requerimiento de caudal de aire en los frentes de trabajo.

**1.1. Aspectos que se deben tener en cuenta en minas como la UEA Santander, Glencore.**- La Empresa Minera “Los Quenuales” con su unidad administrativa económica Santander (UEA Santander), ubicada en la provincia Huaral, departamento de Lima; actualmente, esta unidad minera cuenta con un LOM (life of mine) de cinco años, su sistema de ventilación es forzado, donde está conformado por dos ventiladores extractores de 100,000 cfm ubicados en el RB-VENT - 4670 (Magistral Norte) y RB-VENT - 4529 (Magistral sur) y con un ventilador de 160,000 cfm ubicado en el RB-VENT- 4310 (Magistral Central), todos los ventiladores extractores se encuentran en superficie. Los ingresos de aire comprende tres bocaminas y un crucero –BM Magistral Norte, BM Magistral Centro, BM Magistral Sur y CX-4040–, el requerimiento actual es de 421,940 cfm y se tiene un ingreso de 431,145 cfm de aire fresco, entregando una cobertura del 102%, al incrementar la producción actual de 1,800 TMD (toneladas métricas por día) a 2,200 TMD que implica el incremento de cinco volquetes Mercedes Benz modelo Actros 3344k 6x4 representando un requerimiento de aire de 159,932 cfm; Un Scoop de 6.3 Yds<sup>3</sup> que representa un requerimiento de aire de 15,466 cfm y 11 trabajadores representando 2,331 cfm de aire, un total de 177,728 cfm de aire limpio, es por ello que es necesario la planificación del sistema de ventilación a largo plazo.

Actualmente, para la planificación del sistema de ventilación en las minas subterráneas se tiene disponibles herramientas 3D, como el software *Ventsim*, esta herramienta analiza a mayor detalle el comportamiento del flujo de aire en los proyectos planteados, así como también una evaluación de numerosos escenarios más viables para la operación, representando un importante ahorro de tiempo. Herramienta tecnológica que la unidad minera Santander, Glencore no cuenta, limitando la planificación del requerimiento de ventilación a largo plazo. Por ello, es necesario realizar en unidad minera Santander, Glencore un modelamiento, caracterización y simulación del sistema de ventilación con el soporte del software *Ventsim Design* que permita planificar a largo plazo los proyectos de ventilación en esta unidad minera.

Ventilación de minas, refiere McPherson (2016) [7], es el transporte de aire a través de las galerías, cruceros y rampas hacia un frente de trabajo, donde el aire contaminado se direcciona hacia una salida a fin de evitar la recirculación, de manera que la ventilación de minas tiene por objeto proveer aire limpio en los frentes de trabajo y tránsito. Con el sistema de ventilación de minas el aire fresco ingresa a través de uno o más pozos de admisión, galerías, rampas, socavones u otras conexiones con la superficie; de manera que el aire fluye a través de los conductos de ingreso hacia las áreas o lugares de trabajo, donde se suman los contaminantes del aire, como polvo, gases tóxicos o inflamables, calor, humedad o radiación; este aire contaminado circula a lo largo de los conductos de retorno, evitando que la concentración de los contaminantes exceda los valores límites que tipifica la ley y la seguridad del personal que circula en todo el sistema de ventilación. Los



conductos de ingreso de aire fresco y los de retorno de aire son los ingresos y retornos respectivamente; el aire de retomo regresa a la superficie a través de uno i más pozos de salida o por las galerías inclinadas u horizontales.

En este sentido, frente a la necesidad de mejorar la planificación a largo plazo del sistema de ventilación de las minas subterráneas, a fin de satisfacer la demanda de aire proyectada y la evaluación del comportamiento y sensibilidad del flujo de aire de acuerdo con los requerimientos de la unidad minera Santander, Glencore con el soporte del software Ventsim™ Design.

El uso del software Ventsim™, conforme a la experiencia de Derrington (2015) [4] que experimentado con el uso del Ventsim para diseñar y solucionar problemas de planificación a largo plazo de la ventilación en minas, con este software ha integrado una amplia gama de tipos de flujos de aire, calor, fuego y funciones de modelamiento de radiación, que antes requerían programas y cálculos externos, valorándose la nitidez de los gráficos en 3D y la rápida caracterización de un modelo, valiéndose de la importación de archivos con el diseño de tu mina.

Corimanya (2011) [3] precisa que el software Ventsim™, puede ser usado para determinar:

- Los flujos de aire y sus sentidos de avance en las labores proyectadas y determinar los cambios en presiones y caudales cuando nuevas labores son añadidas al modelo.
- Cambios de velocidades del aire en las diferentes labores.
- Los puntos de operación de los ventiladores, los requerimientos de energía eléctrica y otros factores económicos.
- Caídas de presión del aire en los conductos primarios y auxiliares indicando alternativas de mejora en los circuitos.
- Evitar gastos innecesarios en construcción de chimeneas inadecuadas, ya sea por su mala ubicación o tamaño inadecuado.
- Generar un sistema de ventilación eficiente y económica, para ello se debe tener un buen conocimiento de geología y el método de explotación usado en la mina; el programa por sí solo no generara un sistema de ventilación eficiente, se necesita de la lógica y la experiencia del ingeniero para generar dicho sistema (Corimanya y Méndez, 2011) [3].
- El software *Ventsim Design* es una herramienta potente para modelar y simular escenarios a futuro del sistema de ventilación de la mina, teniendo en cuenta siempre la calibración del modelo, que tiene que estar en un 90%, para la confiabilidad de los escenarios simulados. Facilita la visualización de velocidades, recirculación de aire, variación de temperaturas, presiones, distribución de caudal, dando al usuario un análisis completo y una mejor evaluación del comportamiento del flujo en su sistema de ventilación, así como la simulación de escenarios, que conlleva a una mejor planificación del sistema de ventilación de la mina, evitando problemas de requerimiento de aire y reingeniería a futuro.
- La planificación del sistema de ventilación de minas, tal como refiere McPherson (2016) [7], el diseño de un sistema principal de ventilación y control ambiental subterráneo es un proceso complejo con muchos factores interactivos. Se deben aplicar los principios de los análisis de sistemas para asegurar que las consecuencias de tales interacciones no sean pasadas por alto. Sin embargo, la ventilación y el entorno subterráneo no deben ser tratados por separado sino durante los ejercicios de planificación.
- La consideración de los esquemas de ventilación es fundamental en el proceso de planificación a medio y largo plazo de la mina, dado que la correcta planificación, permite reducir costos en infraestructura minera (Luque, 2005) [6].

**2. Materiales y Métodos.** - Según la naturaleza del estudio, es aplicada, dado que se realizó una investigación que demuestra los resultados de la toma de data en campo, plasmado en una herramienta 3D con un nivel de calibración del 90% el comportamiento del sistema de ventilación de la mina Santander es real a lo que sucede en la mina. Es de enfoque cuantitativo, utiliza datos numéricos y la recopilación de información es objetiva y precisa usando instrumentos válidos y confiables. De diseño transversal ya que la toma de datos se realizó en un momento dado. El nivel de investigación es predictivo.

La mina ubicada al noreste de Lima con redes regionales acceso de carreteras por Huaral, Cerro de Pasco y Canta. El levantamiento de data, tapones, compuertas, ventiladores auxiliares, ventiladores principales, obstrucciones y orificios del sistema de ventilación se realizó del 12 al 22 de agosto del 2017, La validación de la calibración del sistema de ventilación en el software Ventsim se realizó el 15 de noviembre del 2017. Se trabajó con toda la población, realizando siete estaciones principales en los ingresos y salidas de aire, 154 estaciones secundarias en toda la red del sistema (accesible) se midió la velocidad de aire, concentración de oxígeno, condiciones termo ambientales, resistencias y dirección del flujo de aire en los siguientes niveles, que cuentan con cuatro pisos o subniveles cada nivel: Nv. 4230, Nv. 4300, Nv. 4370, Nv. 4440, Nv. 4510, Nv. 4580.

Los instrumentos para iniciar con la recolección de datos de la toma de datos en campo, y plasmado en el software Ventsim con un nivel de calibración del 90% el comportamiento del Sistema de ventilación de la mina Santander es real a lo que sucede en la mina. El procedimiento se describe a detalle de la forma correcta del levantamiento de data del sistema de ventilación principal y secundaria. La información primaria brindada por los datos de campo se evaluó superficialmente; luego se le dio una confiabilidad adecuada, para lo cual se utilizó diversas herramientas digitales; en la Figura I, se visualiza el procedimiento de este proyecto, detallando los trabajos realizados en cada etapa.

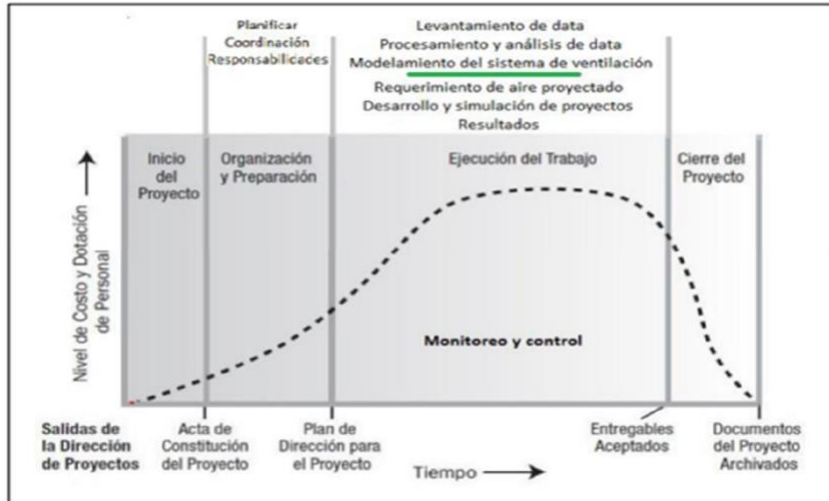


Figura I.- Procedimiento del estudio - proceso del proyecto.

El levantamiento del sistema de ventilación es un proceso sistemático de evaluación de las condiciones de mina a través de un planteamiento de captura de una línea base en un determinado momento. Incluye así mismo el levantamiento de los aforos de la mina (ingreso y salida), levantamiento del circuito principal y secundario como velocidad del aire, sección de la labor,

presión, parámetros medioambientales, factor de fricción de las labores, condición de labores, condición de trabajo de los ventiladores, características de los ventiladores y las mangas de ventilación, se realiza al mayor detalle posible para la caracterización en la herramienta 3D.

El procesamiento y análisis de data recopilada en campo, velocidad, presión, secciones, parámetros ambientales y detalles de las labores se realizó con herramientas digitales como Excel, AutoCAD y el D.S.024-2016-EM y su modificatoria D.S. 023-2017-EM.

**3. Resultados y Discusión.** - Procesados los datos, se procedió al modelado 3D del sistema de ventilación con el software *Ventsim Design 5*, tal como se muestra en la Figura II y Figura III, para realizar el modelamiento de los conductos del sistema de ventilación que comprende toda la mina, se detalla cruceros, galerías, chimeneas, rampas, compuertas, reguladores, obstrucciones, dimensión de labores y caracterización de ventiladores.

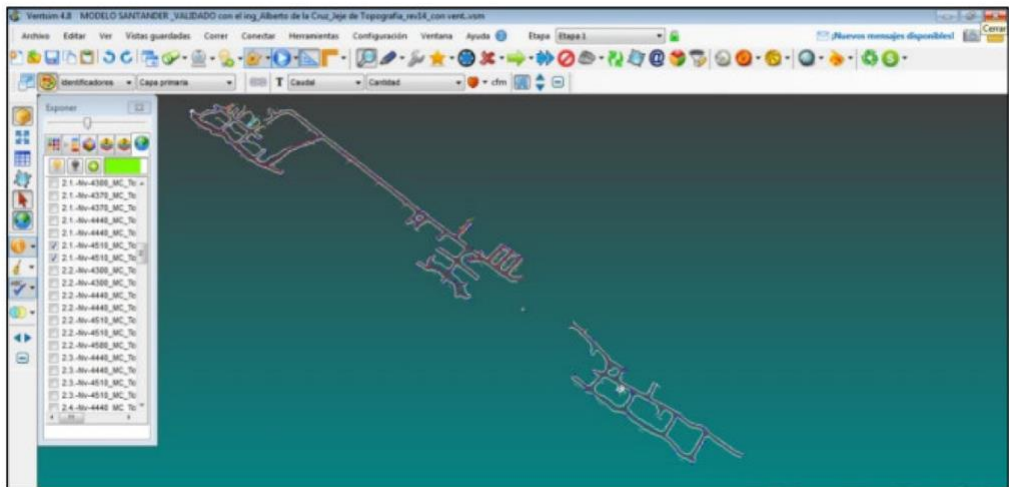


Figura II.- Importación de datos topográficos DXF.

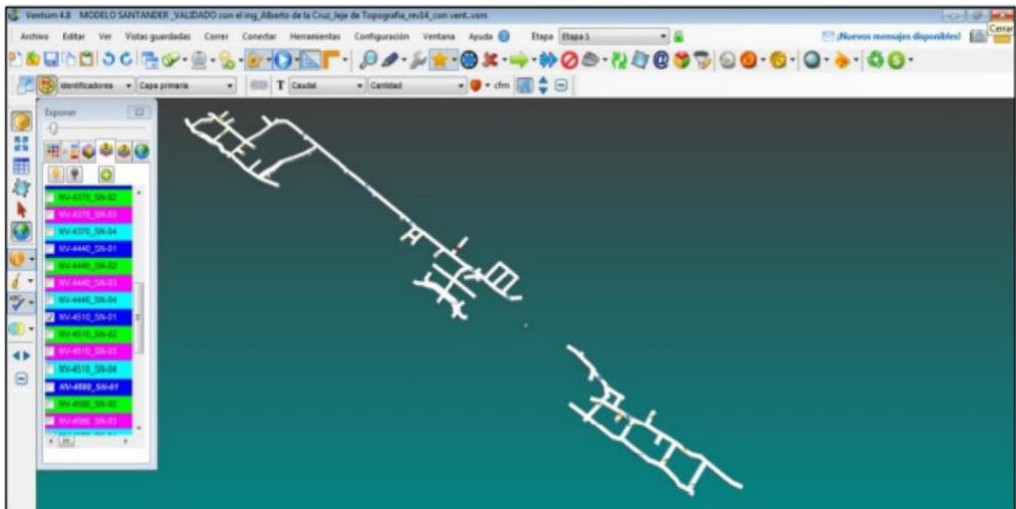


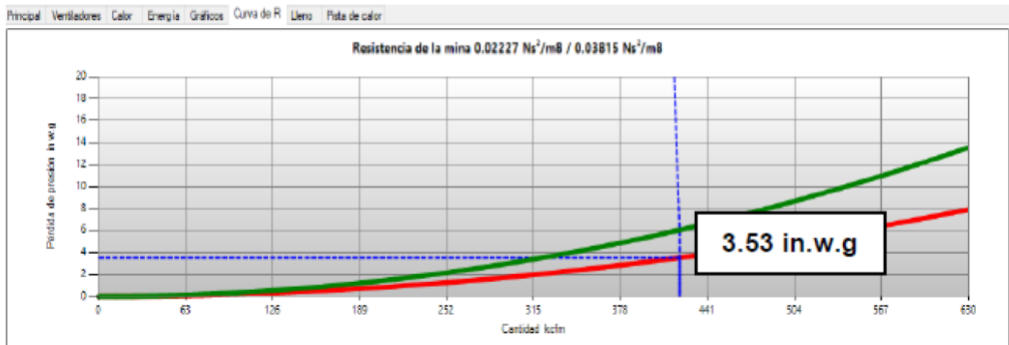
Figura III.- Conversión de DXF a Galerías, cruceros, by pass.

En la Figura IV se muestra el resumen del estado del sistema actual, observándose que el balance general de ingresos y salidas de la mina, el caudal de aire que ingresa al sistema es de 419,005 cfm, también se tiene la resistencia de la mina (Figura V), la longitud total de las labores y demás parámetros calculados por el software Ventsim Visual Avanzado, que permite el análisis de las diversas variaciones del sistema de ventilación.

RESUMEN DE LA RED DEL SISTEMA	
Flujos de aire compresible	Si
La presión de ventilación natural	Si
Tipo de simulación de la presión del ventilador	Método de la presión total
Etapa	0: Modelo Actual
Todos los conductos de aire	5852
Actual etapa conductos	4588
Segmentos de etapa actual	2310
Longitud total	43,296.3 m
Caudal de aire total de admisión	419,005 cfm
Caudal de aire total de escape	422,749 cfm
Flujo de masa total	138.55 kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	0.02251 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
Resistencia de la mina (Incluyendo el conducto)	0.03840 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
RESUMEN DE POTENCIA	
Potencia del AIRE (pérdida por fricción)	403.5 hp Total
	144.3 hp Chimenea
	92.2 hp Conducir
	167.0 hp Conducto de ventilación
Refrigeración Potencia de entrada	0.0 hp
Potencia eléctrica de ENTRADA	706.6 hp
Costo de energía anual de la red	\$ 452,343
Eficiencia de la red	57.1 %
<b>Que consta de ...</b>	
13 Ventiladores	706.6 hp

Nota. Modelo Ventsim

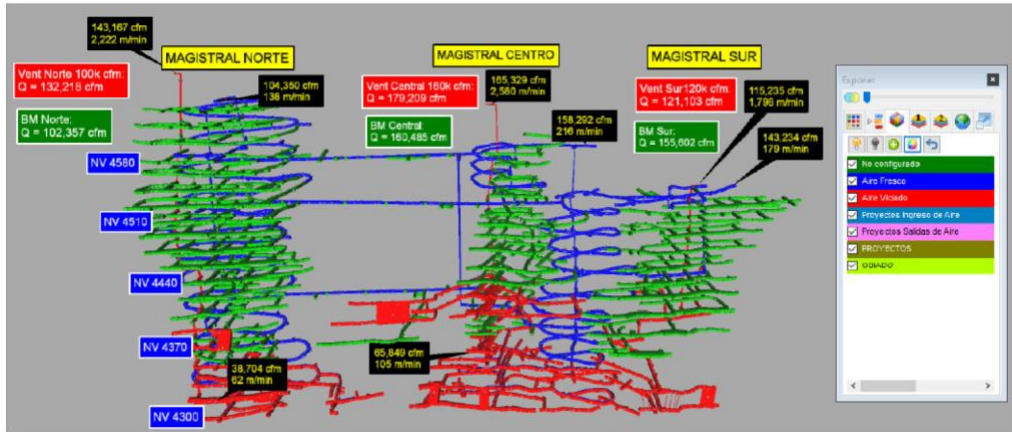
Figura IV.- Resumen del sistema actual – Ventsim.



Nota. Modelo Ventsim

Figura V.- Resistencia de la mina en Ventsim.

En la Figura VI se muestra el sistema de ventilación actual con sus respectivos ingresos y salidas de aire.



Nota. Modelo Ventsim

Figura VI.- Circuito de sistema de ventilación actual de aire limpio y viciado.

Considerando que el aire requerido a largo plazo, con el incremento de 11 trabajadores y 6 equipos, de acuerdo con el D.S. 023-2017 EM en su artículo 252, la cobertura global de aire se proyecta respecto al actual en 69%, representando un déficit de 195,182 cfm, tal como se muestra en la Tabla I.

Balance Total de Aire a Largo Plazo en Base al Sistema Actual		
Distribución de Aire	m3/min	cfm
Total de aire requerido	17,735	626,327
Ingreso de aire	12,209	431,145
Salida de aire	12,248	432,531
<b>Cobertura (%)</b>	<b>69%</b>	
<b>Déficit (cfm)</b>	<b>195,182</b>	

Nota. Elaboración propia.

Tabla I.- Balance del aire actual.

En la Tabla II se visualiza los caudales de ingreso de aire fresco de 678,400 cfm y en la Tabla III la salida de aire viciado de 698,500 cfm proyectados para largo plazo.

Estac.	Nivel-Piso	UBICACIÓN		SECCIÓN	AREA	VELOCIDAD		Caudal Campo		Distrib.		
		Labor	Detalle			a (m)	h (m)	FORMA	m2		m/s	m/min
EVP-01	4580-4	RP(-)4577	BM Magistral Norte	5.47	3.98	BAUL	20.42	2.85	171	3,494	123,400	18.2%
EVP-02	4580-1	BP-4580	BM Magistral Centro	5.40	3.95	BAUL	20.01	6.83	410	8,198	289,500	42.7%
EVP-03	4510-2	RP(-)4005	BM Magistral Sur	4.87	4.46	BAUL	20.37	3.25	195	3,970	140,200	20.7%
EVP-04	Superf.	RB-02 (nuevo)	BM Magistral Centro	3.10	Φ	BAUL	7.54	7.84	471	3,548	125,300	18.5%
<b>TOTAL INGRESO</b>										<b>19,210</b>	<b>678,400</b>	<b>100.0%</b>

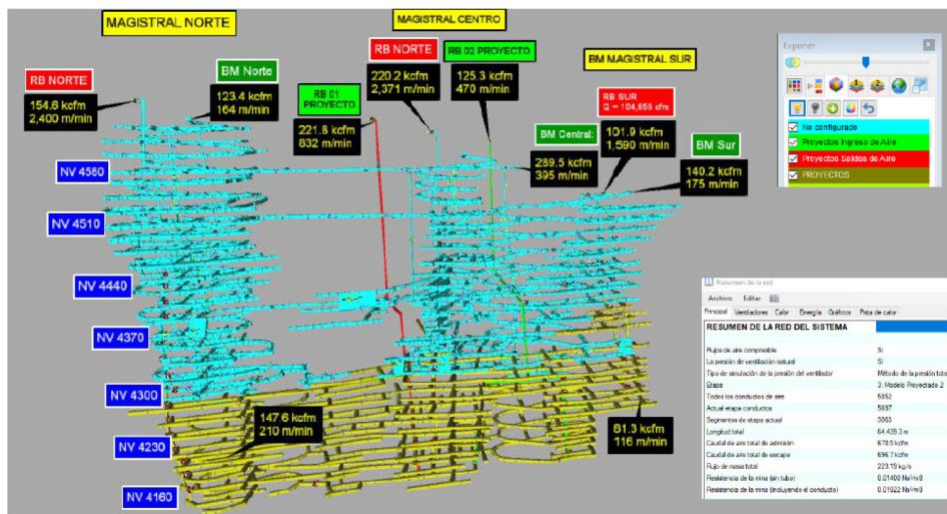
Nota. Elaboración propia.

Tabla II.- Ingreso de aire fresco proyectado a largo plazo.

Estac.	UBICACIÓN		Detalle	SECCIÓN		VELOCIDAD		Caudal Campo		Distrib.
	Nivel	Labor		∅	m2	m/s	m/min	m3/min	cfm	
EVP-01	Superf.	RB-VENT-4670	VAV-60-30-1750-II-B-160 kcfm-Magistral-Norte	2.05	3.30	22.11	1,326	4,378	154,600	22.1%
EVP-02	Superf.	RB-VENT-4310	2 VENT.-VAV-60-26.5-1750-II-A-120 kcfm-Magistral-Centro	2.05	3.30	31.49	1,889	6,235	220,200	31.5%
EVP-03	Superf.	BM Magistral Sur	VAV-60-26.5-1750-II-A-120 kcfm-Magistral-Sur	2.05	3.30	14.57	874	2,885	101,900	14.6%
EVP-04	Superf.	RB-01 (nuevo)	VAV-84-43-1150-II-B-Magistral-Centro	2.13	3.56	29.38	1,763	6,281	221,800	31.8%
<b>TOTAL SALIDA</b>								<b>13,499</b>	<b>698,500</b>	<b>100%</b>

Nota. Elaboración propia.  
 Tabla III.- Salida de aire viciado proyectado a largo plazo.

En la Figura VII se muestra el sistema de ventilación proyectado a largo plazo.



Nota. Modelo Ventsim  
 Figura VII.- Sistema de ventilación proyectado a largo plazo.

Para cubrir el 100% de cobertura de aire fresco a largo plazo de acuerdo con el D.S. 024-2016-EM y su modificatoria D.S. 023-2017-EM, con el requerimiento de aire de 626,327 cfm, es necesario incrementar la capacidad de aire limpio con un plan de proyectos de transición de mediano a largo plazo: en la Tabla IV se visualiza la evolución del balance con los proyectos planteados.

Item	Descripción	Actual	Mediano plazo	Largo plazo
1	Ingreso de aire	431, 940	482, 646	678, 400
2	Requerimiento de aire	421, 940	421, 940	626, 327
3	Balance	102%	114%	108%

Nota. Elaboración propia.  
 Tabla IV.- Variación de caudal de ingreso y balance actual – mediano y largo plazo.

De manera que los principios básicos para la planificación y diseño 3D del sistema de ventilación a largo plazo, caso estudio mina Santander – Glencore a tenerse en cuenta, según aprecia Corimanya & Oyola (2017) [2] en su experiencia enfatizan que se debe planificar el sistema de ventilación con el programa de diseño Ventsim para cumplir con el requerimiento de aire a largo plazo. Se debe diseñar la ventilación para el corto y mediano plazo de la explotación de la mina subterránea, donde se contemplan un nuevo escenario con la introducción de los equipos; el diseño del circuito de ventilación se basó con la aplicación del software Ventsim 4.8, que tiene funciones de diseñador de labores. Por su parte Carrasco (2017) [1] se debe diseñar en una herramienta 3D el sistema de ventilación de la unidad minera Santander – Glencore para una evaluación detallada del comportamiento del sistema de ventilación a largo plazo. Cabe señalar que Corimanya (2011) [3] refiere que en la Mina San Cristóbal se utiliza el Programa VNET PC para generar circuitos principales para labores actuales y futuras. En el planeamiento de la ventilación, un simulador es una herramienta de trabajo que nos ayuda representar la mina por un modelo numérico que puede ser usado para predecir los requerimientos de ventilación. Y por su parte Guillen (2016) [5] condice con los antes referidos quien sostiene que diseñar un sistema de ventilación a través de un simulador es una técnica viable y confiable, evitando gastos innecesarios en equipos e infraestructura.

**4. Conclusiones.** - Con la adecuada planificación bajo el soporte del software Ventsim, se cumple con el requerimiento de aire fresco a largo plazo y permite la evaluación del comportamiento y sensibilidad del flujo de aire de acuerdo con los avances en la unidad minera Santander, Glencore; con una cobertura de aire al 108%, de esta manera se cumple con el requerimiento establecido en el D.S. 024 - 2016 – EM y su modificatoria D.S. 023 - 2017 – EM.

La planificación del sistema de ventilación a largo plazo con el soporte de la herramienta 3D Ventsim con una calibración de 90% de los datos tomados en campo, garantiza el requerimiento de aire proyectado y tener el sistema de ventilación proyectado en el software Ventsim que ayuda evaluar el comportamiento y sensibilidad del flujo de aire de acuerdo a los avances en el sistema. Al elaborar proyectos del sistema de ventilación a largo plazo con el soporte del software Ventsim permite cumplir con el requerimiento de aire proyectado a largo plazo.

## 5. Referencias

- [1] Carrasco, J. (2017). “Reformulación del sistema de ventilación del proyecto mina Chuquicamata subterránea.” *Simposio Internacional de Ventilación de Minas*.
- [2] Corimanya, J.A. y Oyola, H. (2017). “Estudio del Proyecto de Mejoramiento de Ventilación”, Mina Chavincha, Ayacucho - Perú. *Simposio Internacional de Ventilación de Minas*.
- [3] Corimanya, J. A., & Méndez, F. R. (2011). “Planeamiento de Ventilación Asistida para la Unidad Peruana San Cristóbal- Cía. Minera San Cristóbal.” [Tesis de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Universidad Nacional de Ingeniería].
- [4] Derrington, A. (2015). “La solución definitiva del diseño de ventilación de minas”, Howden
- [5] Guillen, C. (2016). “Optimización del sistema de ventilación aplicando tecnologías informáticas minera Hemco– Nicaragua.” Universidad Nacional de Ingeniería.
- [6] Luque, V. (2005). “Manual de ventilación de minas.” Madrid, España: PEDECA, S. Coop, Ltda.
- [7] McPherson, M. (2016). “Ingeniería de ventilación subterránea.” California, Estados Unidos: Omnipres

### Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

VAPE ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

EAHM ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.



# Desarrollo de Sistema de Aislamiento Sísmico de Bajo Costo para Viviendas de Albañilería de 01 a 02 niveles

*Development of a Low-Cost Seismic Isolation System for Masonry Housing of 01 to 02 levels*

*Desenvolvimento de Sistema de Isolamento Sísmico de Baixo Custo para Casas de Alvenaria de 01 a 02 pavimentos*

Yalmar Carrera <sup>1</sup>, Enrique Simbort <sup>2</sup>

Recibido: 28/01/2023

Aceptado: 22/03/2023

**Resumen.** - El elevado costo de los dispositivos antisísmicos en la actualidad, hace prácticamente imposible su uso en edificaciones de viviendas de comunidades de escasos recursos económicos, dejándolas expuestas a los acontecimientos sísmicos. Por dicho motivo, se tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de aislamiento sísmico de bajo costo, elaborado con materiales económicos y accesibles. En la etapa inicial se desarrolló un modelo matemático, analizando su estabilidad mediante retratos de fase y el principio mínimo de energía potencial. A continuación, se analizó la influencia de parámetros geométricos en la respuesta dinámica del sistema. Con la implementación numérica del modelo, se analizó la respuesta estructural del sistema cuando es sometido a sismos con contenidos de frecuencias distintos, obteniendo como resultado una reducción de aceleraciones totales que varían entre un rango de 4.5 veces. El sistema se validó a través de la adquisición de las propiedades dinámicas con sismógrafos, de un modelo experimental expuesto a microtrepidaciones; y su comparación con los resultados obtenidos del modelo matemático. El sistema de aislamiento propuesto no solo reduce las aceleraciones bajo los sismos propuestos, sino que también posee la característica principal de un sistema de aislamiento sísmico: Elongación de periodos.

**Palabras clave:** Protección Sísmica; Sistema de Aislamiento de Bajo Costo; Superficie cóncava; Aislador esférico.

**Summary.** - *The high cost of current anti-seismic devices makes it practically impossible to use them in housing buildings in low-income communities, leaving them exposed to seismic events. For this reason, the objective is to develop a low-cost seismic isolation system, made with inexpensive and accessible materials. In the initial stage, a mathematical model was developed, using its stability by means of phase portraits and the minimum potential energy principle. Then, the influence of geometrical parameters on the dynamic response of the system was analyzed. With the*

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, yalmar.carrera@ucsp.edu.pe, Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2543-166X>

<sup>2</sup> PhD Ingeniería Estructural, egsimbort@ucsp.edu.pe, Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5187-3309>

*numerical implementation of the model, the structural response of the system was analyzed when subjected to earthquakes with different frequency contents, obtaining as a result a reduction of total accelerations that vary between a range of 4.5 times. The system was validated through the acquisition of the dynamic properties with seismographs, of an experimental model exposed to microtremors; and its comparison with the results obtained from the mathematical model. The proposed isolation system not only reduces the accelerations under the proposed earthquakes but also possesses the main characteristic of a seismic isolation system: period elongation.*

**Keywords:** *Seismic Protection; Low-Cost Isolation System; Concave Surface; Spherical Isolator.*

**Resumo.** - *O alto custo dos dispositivos antissísmicos hoje praticamente impossibilita seu uso em prédios residenciais de comunidades de baixa renda, deixando-os expostos a eventos sísmicos. Por isso, o objetivo é desenvolver um sistema de isolamento sísmico de baixo custo, feito com materiais baratos e acessíveis. Na etapa inicial, foi desenvolvido um modelo matemático, analisando sua estabilidade através de retratos de fase e o princípio mínimo de energia potencial. Em seguida, foi analisada a influência dos parâmetros geométricos na resposta dinâmica do sistema. Com a implementação numérica do modelo, foi analisada a resposta estrutural do sistema quando submetido a sismos com diferentes conteúdos de frequência, obtendo como resultado uma redução das acelerações totais que variam entre um intervalo de 4,5 vezes. O sistema foi validado através da aquisição das propriedades dinâmicas com sismógrafos, de um modelo experimental exposto a microtrepidações; e sua comparação com os resultados obtidos a partir do modelo matemático. O sistema de isolamento proposto não apenas reduz as acelerações sob os terremotos propostos, mas também possui a principal característica de um sistema de isolamento sísmico: o alongamento do período.*

**Palavras-chave:** *Proteção Sísmica; Sistema de Isolamento de Baixo Custo; superfície côncava; isolador de bola.*

**1. Introducción.-** El territorio peruano se encuentra en una amenaza constante dado que, geográficamente, se posiciona sobre el cinturón de fuego del pacífico [23] [2]. En esta zona, ocurrieron los eventos sísmicos más devastadores de la tierra, entre ellos, los terremotos de Lima 1960, Lima 1974, Arequipa (Camaná) 2001, Ica (Pisco) 2007, Arequipa (Atico) 2018. Asimismo, el cinturón de fuego del pacífico, abarca tres cuartas partes de todos los volcanes del mundo [1] [2]. En consecuencia, existe el peligro constante ante eventos sísmicos de gran intensidad que puedan ocurrir en la región del Perú. El correcto comportamiento de una estructura implica el equilibrio entre la seguridad y comodidad, para ello, durante todo el proceso del diseño y construcción, en primera instancia, se busca controlar los esfuerzos internos, externos y sus consecuentes desplazamientos. Las fuerzas y esfuerzos que se imponen a la estructura son sustentados por los elementos portantes (elementos estructurales), lo cual implica, que los esfuerzos producidos por las cargas sísmicas a la estructura tienen un gran rango de variación.

Es común que los elementos estructurales logren disipar la energía a través del daño, comprometiendo la integridad del edificio. Para atender esta necesidad a lo largo del tiempo se han desarrollado distintos sistemas de disipación de energía, siendo los más eficientes y conservativos los métodos de aislamiento y control de vibraciones pasivas [26] [21]. El uso de este tipo de sistemas y dispositivos en edificaciones está aumentando en el mundo [6], aunque la medida de su uso está fuertemente influenciada por la experiencia sísmica [9] y las características de las normas de diseño locales. Teniendo como principal premisa la preservación de la vida durante y después de un sismo, los dispositivos disipadores de energía han sido principalmente utilizados en estructuras de carácter esencial, tales como hospitales, colegios, y otros espacios que puedan ser utilizados como albergues y centros de atención para la población, dejando sin atención un gran sector de las edificaciones tales como las estructuras menores, las cuales presentan un problema de irregularidades y/o fallas estructurales importantes, siendo incapaces de soportar las acciones sísmicas a las que puedan ser sometidas. Dicha carencia no se debe principalmente a la falta de compatibilidad, sino más bien a que los sistemas de aislamiento sísmico no son accesibles económicamente a la sociedad. Algunos códigos de diseño sismorresistente han permitido aprovechar económicamente los sobrecostos que implica aislar una estructura; pero aun con ellos, existen grandes brechas que no se han podido suplir, en su gran mayoría asociadas al alto impacto económico en un presupuesto de una estructura menor.

Para solucionar este problema, se propuso, en otras regiones bajo amenaza sísmica, distintos sistemas de aislamiento de bajo costo [16]; por ejemplo, con enfoque en la fricción entre diversos materiales como el caucho reciclado [8] [20] [22] [24] [25], arena [27], PVC [27], membranas de polietileno [28], cojinetes de deslizamiento [11] y con enfoque cinemático, usando concreto armado [3-5] [15]. Logrando obtener una reducción de aceleraciones de hasta el 75%, logrando aumentar la resiliencia de las edificaciones.

Para suplir esta brecha de edificaciones desatendidas en nuestra región [7] [10] [13], se propone el desarrollo de modelos de aisladores sísmicos elaborados con materiales accesibles como el concreto armado; y su validación a través de un prototipo. Esto contribuirá al fortalecimiento de la resiliencia sísmica en el Perú, con el propósito fundamental de que las comunidades tengan la capacidad de recuperarse rápidamente después de un sismo de gran magnitud e intensidad, a través de la mitigación y preparación pre-desastres.

**2. Sistema de aislamiento de tipo Esfera: Superficie cóncava.** - El sistema de aislamiento sísmico propuesto de tipo superficie cóncava - aislador esférico consta de esferas distribuidas en toda el área de la estructura, que se apoyan sobre una cimentación con superficies cóncavas. Dichas

esferas soportan el peso de la edificación que se apoya sobre ellas y reduce la aceleración del suelo en la superestructura debido a las características cinemáticas del sistema, las cuales se basan en la traslación y rodamiento. El comportamiento cinemático [17–19] obtenido permite elongar el periodo de la estructura, en consecuencia, el sistema garantiza el incremento de la resiliencia de edificaciones en zonas de alto riesgo sísmico [26].

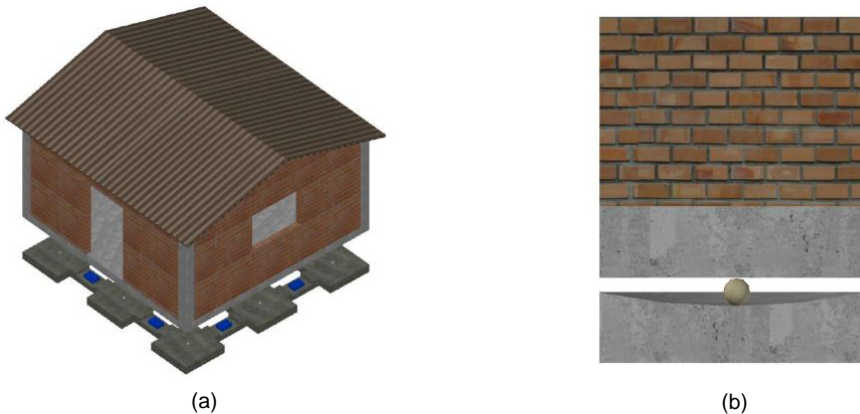


Figura I.- Aplicación del sistema de aislamiento propuesto de tipo: Esfera – Superficie Cóncava, (a) Perspectiva Isométrica. (b) Estructura del sistema propuesto.

La propuesta de sistema de aislamiento sísmico busca reducir la vulnerabilidad estructural para tener un menor riesgo bajo diversos escenarios sísmicos: Sismo de diseño (SD) y sismo máximo considerado (SMC). Con respecto a las condiciones geotécnico-sísmicas, el sistema de aislamiento se implementará en condiciones favorables de suelo debido al alto costo de estudios detallados, diseño y construcción que implicaría trabajar en suelos blandos.

### 3. Modelo Matemático. -

**3.1. Derivación de las ecuaciones de movimiento.** - Para obtener la ecuación de movimiento se aplicó el método de Lagrange [12], para ello inicialmente se ubicó el punto de interés (punto de contacto entre la superficie horizontal superior y la esfera).

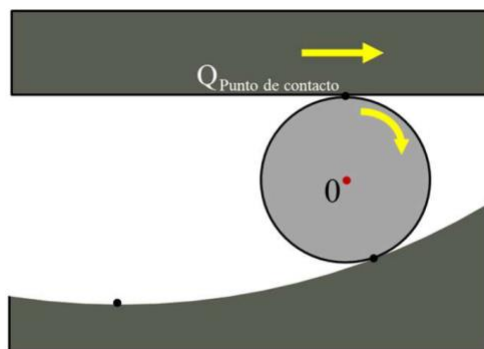


Figura II.- Punto de interés para el sistema de aislamiento propuesto, denotado por  $Q$  (Punto de Contacto).

**(a) Energía Cinética**

La energía cinética depende de encontrar la velocidad del punto de contacto de la plataforma, se aplicó el concepto de centro instantáneo de rotación [14].

$$v = w \cdot l \tag{1}$$

Donde:

w: velocidad angular.

l: longitud del centro instantáneo de rotación al punto de interés.

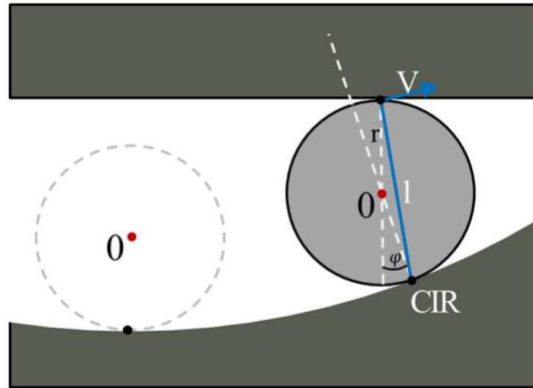


Figura III.- Esquema geométrico para el cálculo de la velocidad del punto de contacto.

Por relaciones geométricas se obtuvo la longitud del centro instantáneo rotación al punto de interés:

$$l = 2 \cdot r \cdot \cos(\varphi/2) \tag{2}$$

De igual manera para el cálculo de la velocidad angular:

$$w = \frac{R - r}{r} \cdot \varphi' \tag{3}$$

Reemplazando (3) y (2) en (1); tenemos la velocidad:

$$v = 2 * (R - r) \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \varphi' \tag{4}$$

Donde:

φ: Coordenada generalizada.

r: Radio de la esfera.

R: Radio de la superficie cóncava.

La energía cinética se expresa como:

$$T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Al reemplazar la expresión (4), tenemos:

$$T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (2 \cdot (R - r) \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \varphi')^2 \quad (5)$$

**(b) Energía Potencial**

La energía potencial depende del desplazamiento vertical del sistema.

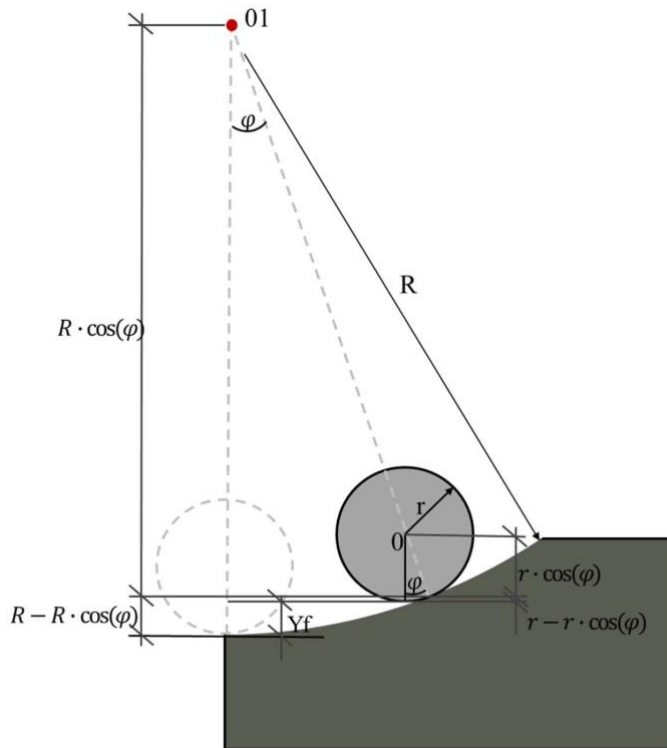


Figura IV.- Esquema geométrico para el cálculo del desplazamiento vertical.

Por relaciones geométricas, se tiene:

$$y_f = (R - R \cdot \cos(\varphi)) - (r - r \cdot \cos(\varphi))$$

Al abreviar la expresión:

$$y_f = (R - r) \cdot (1 - \cos(\varphi)) \quad (6)$$

Para la energía potencial, se reemplazó (6) en:

$$\Pi = m \cdot g \cdot h$$

$$\Pi = m \cdot g \cdot (R - r) \cdot (1 - \cos(\varphi)) \quad (7)$$

### (c) Aplicación de Lagrange

El principio de Lagrange [1]:

$$\frac{dL}{dq_j} - \frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}_j} = 0$$

La coordenada generalizada se realizó con  $\varphi$ :

$$\frac{dL}{d\varphi} - \frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{\varphi}} = 0$$

El lagrangiano (L) se expresa de la siguiente manera:

$$L = T - \Pi$$

Se utilizó las expresiones (5) y (7), las cuales se reemplazaron en el lagrangiano:

$$L = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left( 2 \cdot (R - r) \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \varphi' \right)^2 - m \cdot g \cdot (R - r) \cdot (1 - \cos(\varphi))$$

Al reemplazar (8) en el principio de Lagrange, se obtuvo las siguientes ecuaciones, ecuación de movimiento en oscilaciones libres sin amortiguamiento:

$$(2 + 2 \cdot \cos(\varphi)) \cdot \ddot{\varphi} + \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi) - \frac{g}{R - r} \cdot \sin(\varphi) = 0$$

La ecuación de movimiento al considerar el amortiguamiento:

$$(2 + 2 \cdot \cos(\varphi)) \cdot \ddot{\varphi} + \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi) - \frac{g}{R - r} \cdot \sin(\varphi) + \frac{(2 + 2 \cdot \cos(\varphi)) \cdot C_b \cdot \dot{\varphi}}{m} = 0$$

La ecuación de movimiento tomando en cuenta la excitación sísmica externa:

$$(2 + 2 \cdot \cos(\varphi)) \cdot \ddot{\varphi} + \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi) - \frac{g}{R - r} \cdot \sin(\varphi) + a_g \cdot \frac{(1 + \cos(\varphi))}{R - r} + \frac{(2 + 2 \cdot \cos(\varphi)) \cdot C_b \cdot \dot{\varphi}}{m} = 0$$

### 3.2 Evaluación de condiciones de equilibrio y estabilidad.-

La energía potencial del sistema propuesto se expresa de la siguiente forma:

$$\Pi = m \cdot g \cdot (R - r) \cdot (1 - \cos(\varphi))$$

Como primer paso para la evaluación del equilibrio, se determinó la primera derivada de la energía potencial, obteniendo:

$$\frac{d\Pi}{d\varphi} = 0$$

Al operar se obtuvo:

$$\begin{aligned} \frac{d\Pi}{d\varphi} &= m \cdot g \cdot (R - r) \cdot \sin(\varphi) \\ 0 &= m \cdot g \cdot (R - r) \cdot \sin(\varphi) \end{aligned}$$

El valor de  $\varphi$ :

$$\varphi = 0 \text{ rad}$$

El segundo paso, para evaluar la estabilidad y equilibrio del sistema, se reemplazó el valor de  $\varphi$ , en la segunda derivada:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\Pi}{d\varphi^2} &= m \cdot g \cdot (R - r) \cdot \cos(\varphi) \\ \frac{d^2\Pi}{d\varphi^2} &= m \cdot g \cdot (R - r) \end{aligned}$$

Se realizó un análisis de los siguientes términos de:

$$\text{masa}(m) > 0, \text{ gravedad}(g) > 0 \text{ y } R > r.$$

Dicho análisis nos permitió afirmar que:

$$\frac{d^2\Pi}{d\varphi^2} > 0$$

Por lo que, el sistema se encuentra en equilibrio estable, para la posición:  $\varphi = 0 \text{ rad}$ .



### 3.3 Evaluación de condiciones de estabilidad dinámica usando los retratos de fase.-

El estudio de la estabilidad requirió del retrato fase [14], el cual se realizó a partir del gráfico de la velocidad angular ( $\dot{\varphi}$ ) respecto a la rotación angular ( $\varphi$ ).

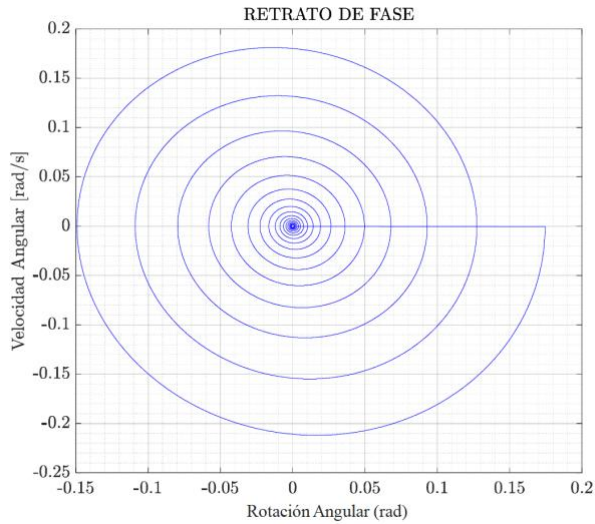


Figura V.- Retrato de Fase para Oscilaciones Libres.

La Figura V muestra el retrato de fase para los valores iniciales de generalizada de  $(\varphi, \dot{\varphi}) = (10^\circ, 0 \text{ rad/s})$ . Con los parámetros geométricos de  $R=1.50\text{m}$  y  $r=0.075\text{m}$ . Se interpreta que el retrato de fase obtiene su posición final para  $(0 \text{ rad}, 0 \text{ rad/s})$ . Esto quiere decir que, el sistema alcanza posición inicial y estable a través del tiempo.

De manera similar se interpreta el retrato de fase para el caso en el que nuestro sistema de aislamiento es sometido a una excitación sísmica, para ello se utilizó el siguiente registro de aceleraciones sísmicas.

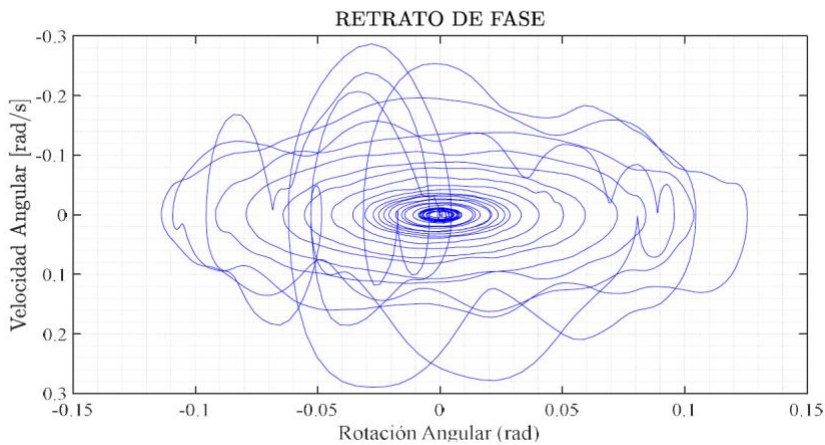


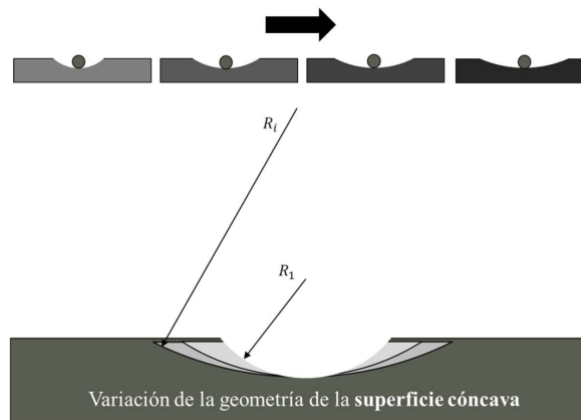
Figura VI.- Retrato de Fase para el Sismo de Kobe (Japón).

El resultado de considerar la fuerza sísmica (sismo de Kobe), con los parámetros geométricos  $R=1.50\text{m}$  y  $r=0.075\text{m}$ . En la Figura VI, se puede apreciar la notable diferencia con el retrato de fase bajo oscilaciones libres, sin embargo, los resultados del sistema coinciden en la posición final, la cual es  $(\varphi, \dot{\varphi}) = (0 \text{ rad}, 0 \text{ rad/s})$ , dicho punto coincide con el punto de equilibrio del sistema, los diagramas fase obtenidos son controlados y estables ya que sus trayectorias tienen características de ser suaves y redondeadas.

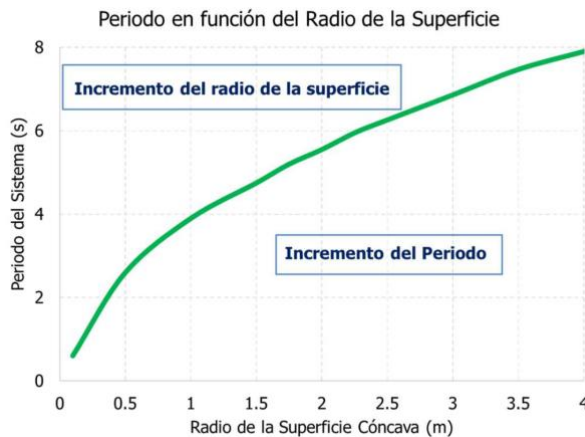
**3.4 Influencia de parámetros geométricos.** - La geometría del sistema aislamiento está caracterizado por el radio de la superficie cóncava ( $R$ ) y el radio de la esfera ( $r$ ). Ambos parámetros fueron evaluados para analizar su influencia en la respuesta dinámica del sistema de aislamiento.

**(a) Influencia de la geometría de la superficie cóncava**

La energía cinética depende de encontrar la velocidad del punto de contacto de la plataforma, se aplicó el concepto de centro instantáneo de rotación [14].



(a)



(b)

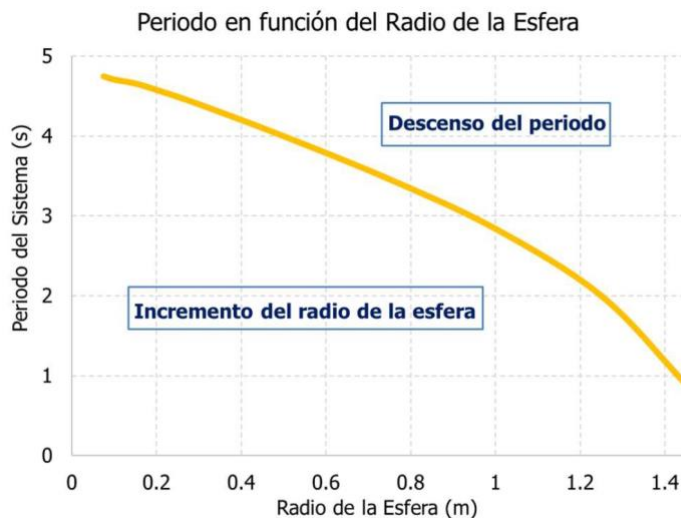
Figura VII.- Influencia de la superficie cóncava en la respuesta dinámica del sistema. (a) Cambios en la geometría de la superficie. (b) Cambio del periodo en función del radio de la superficie.

El incremento del radio de la superficie cóncava ocasionó que el periodo de vibración del sistema de aislamiento propuesto presentará un incremento, es decir, el periodo está en relación directa con radio de la superficie.

**(b) Influencia de la geometría del aislador esférico**



(a)



(b)

Figura VIII.- Influencia del aislador esférico en la respuesta dinámica del sistema. (a) Cambios en la geometría del aislador esférico. (b) Cambio del periodo en función del radio de la superficie.

El incremento del radio de la esfera ocasionó que el periodo de vibración del sistema de aislamiento propuesto presentará un descenso, es decir, el periodo está en relación indirecta con radio de la superficie.

### 3.5 Respuesta dinámica en términos de aceleración absoluta. -

- Aceleración absoluta:

Por relaciones geométricas se obtiene lo siguientes desplazamientos:

$$x_f = (R - r) \cdot \text{sen}(\varphi)$$

$$y_f = (R - r) \cdot (1 - \text{cos}(\varphi))$$

Las velocidades tomando en cuenta la influencia de la rotación de la esfera son:

$$v_x = 2 \cdot (R - r) \cdot \left( \text{cos} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \right)^2 \cdot \dot{\varphi}$$

$$v_y = 2 \cdot (R - r) \cdot \text{cos} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \text{sen} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \dot{\varphi}$$

Las aceleraciones por derivación respecto al tiempo serán:

$$a_x = (R - r) \cdot \left( (1 + \text{cos}(\varphi)) \cdot \ddot{\varphi} - \dot{\varphi}^2 \cdot \text{sen}(\varphi) \right)$$

$$a_y = (R - r) \cdot \left( (\text{cos}(\varphi)) \cdot \ddot{\varphi} - \dot{\varphi}^2 \cdot \text{sen}(\varphi) \right)$$

$a_x$ , es la aceleración relativa horizontal. Para evaluar la respuesta del sistema ante el sismo requerimos de la aceleración absoluta es:

$$a_{abs} = a_x + a_g$$

Donde:  $a_g$ , es el registro sísmico de aceleraciones.

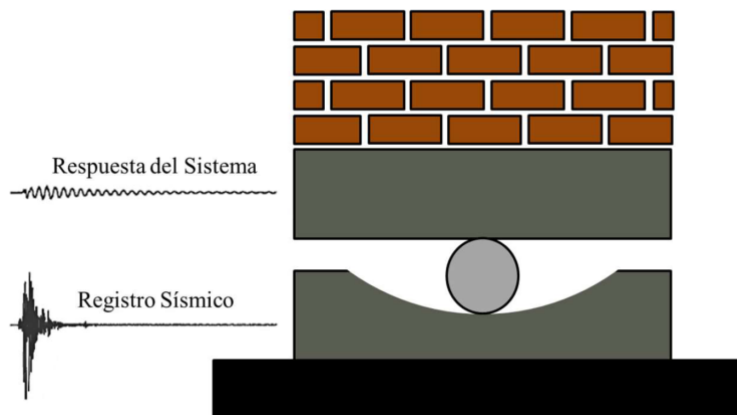
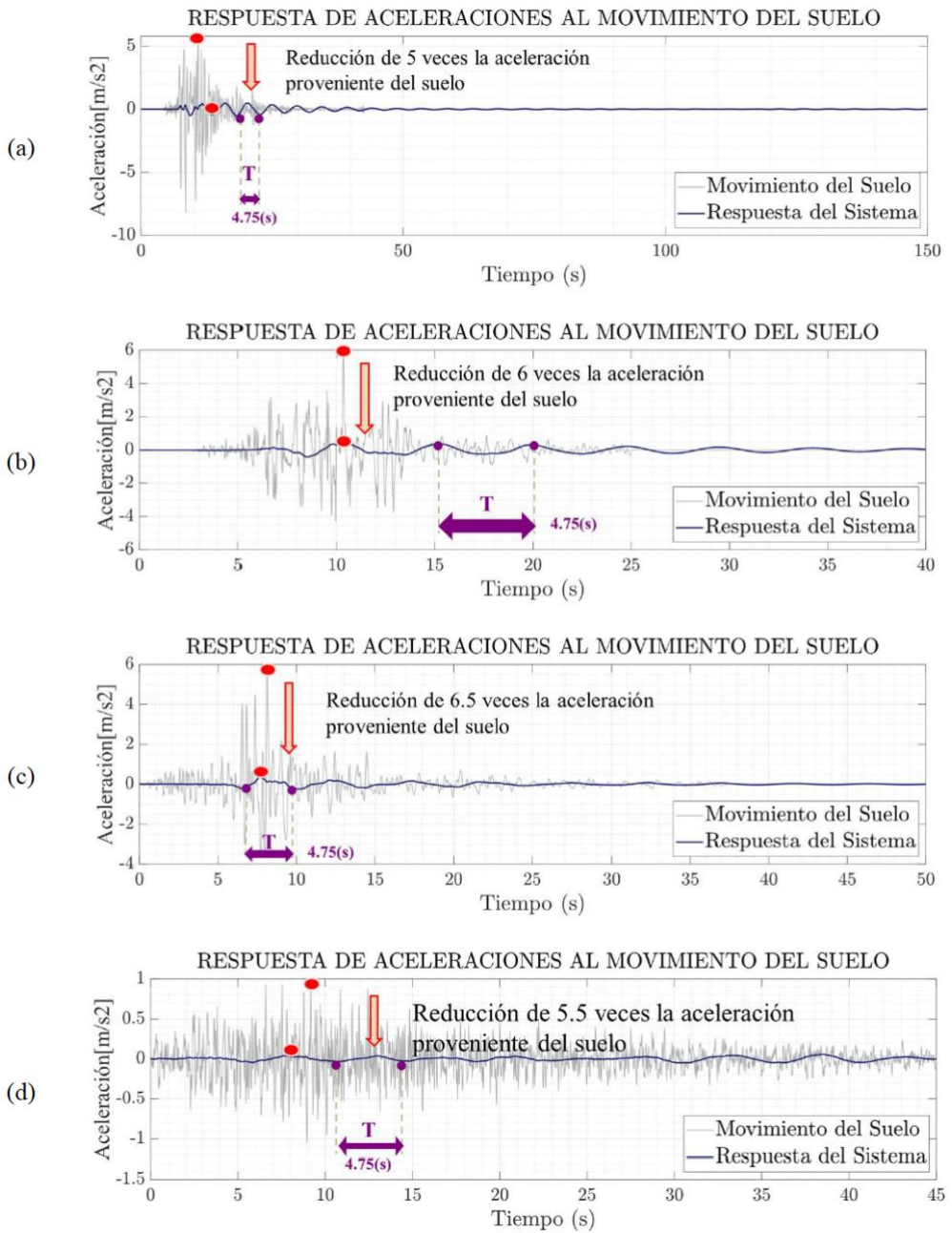


Figura IX.- Respuesta del sistema ante registro sismográfico.



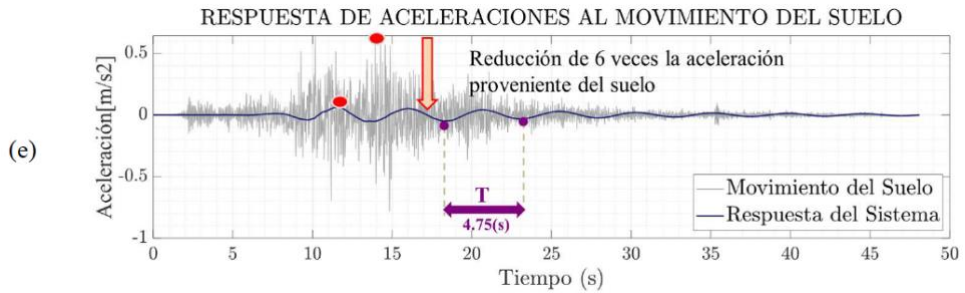


Figura X.- Historia de aceleraciones absolutas del sistema de aislamiento sometido al sismo en: (a) Kobe 1995, (b) Loma Prieta 1989, (c) Northridge 1994, (d) Ancash 1970 y (e) Landers 1992.

#### 4. Validación del modelo matemático. -

**4.1 Descripción y construcción del espécimen. -** El espécimen fue construido para una escala 1:15 con la capacidad de deslizamiento, es decir la superficie cóncava tiene un radio de 150 mm y el radio de la esfera es de 7.5 mm, así mismo, se colocó un sistema de retención limitando el desplazamiento durante las pruebas.

La siguiente figura muestra las secciones, planos de las piezas, así como la representación tridimensional del espécimen construido.

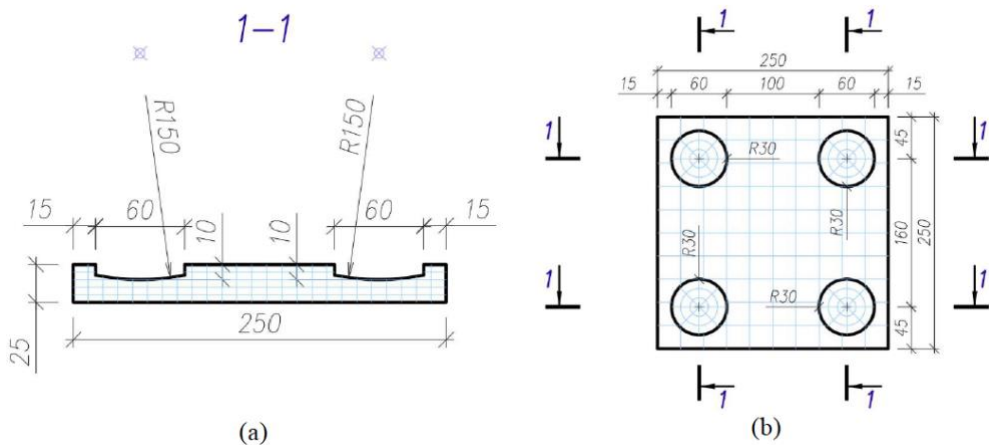


Figura XI.- (a) Vista de sección y (b) Vista en planta del espécimen de la superficie cóncava, unidades en milímetros.

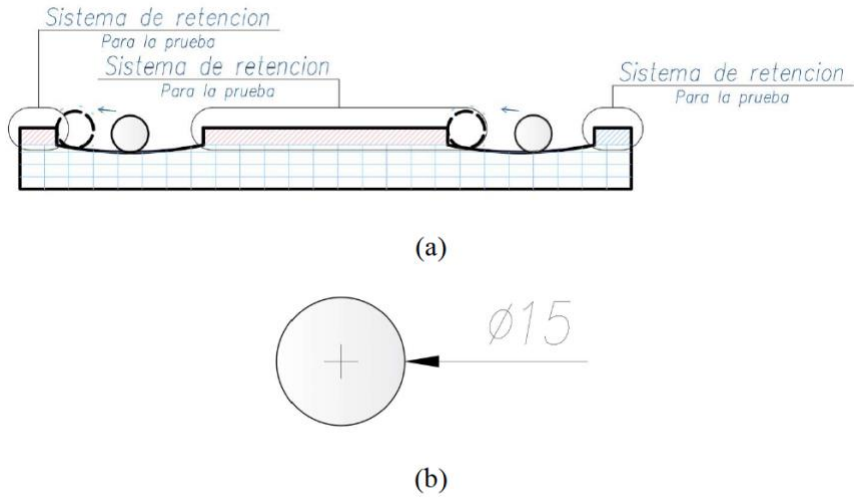
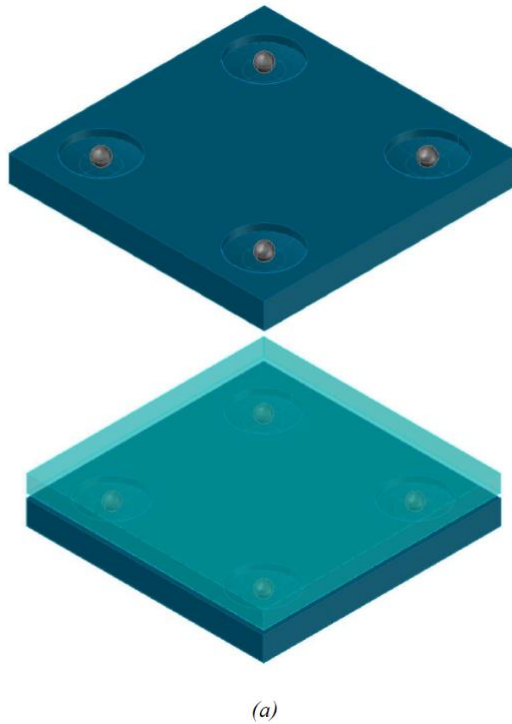


Figura XII.- (a) Sistema de retención para las pruebas y (b) Geometría de la esfera, unidades en milímetros.





(b)

Figura XIII.- (a) Vista tridimensional del espécimen con la placa superior y (b) Sección del espécimen tridimensional.

La placa superior está hecha de ácido poliláctico de manera sólida la cual se logró mediante una impresión 3D, así mismo, se garantizó la uniformidad tanto en medidas como en la ortogonalidad del elemento. La placa inferior fue realizada con MDF de espesor de 28mm, también sólido, finalmente las esferas rodantes fueron de acero para asegurar una geometría precisa y rígida. La geometría de las piezas fue la siguiente:

Elemento	Dimensión
Esfera rodante Material: Acero	Diámetro de 16.0mm
Superficie cóncava Material: MDF	Radio de 14.5cm

Tabla I.- Geometría del espécimen utilizado en la práctica experimental.

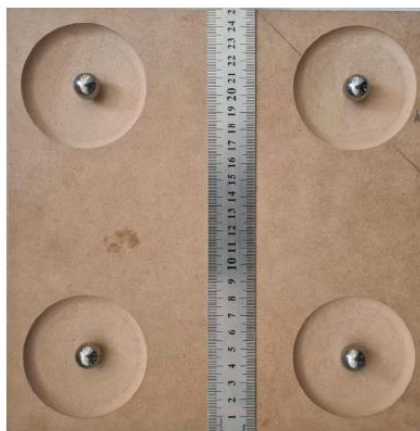


Figura XIV.- Toma de medidas a la geometría del sistema de aislamiento (superficie en MDF y esferas en acero).



**4.2 Equipo y esquema de pruebas.** - El sistema se probó bajo oscilaciones libres con condiciones iniciales de rotación y velocidad. En la Figura XV, se muestran los esquemas del equipo y el sistema propuesto. El sismógrafo, es capaz de darnos la respuesta dinámica del prototipo experimental, para el objeto de estudio: El periodo.

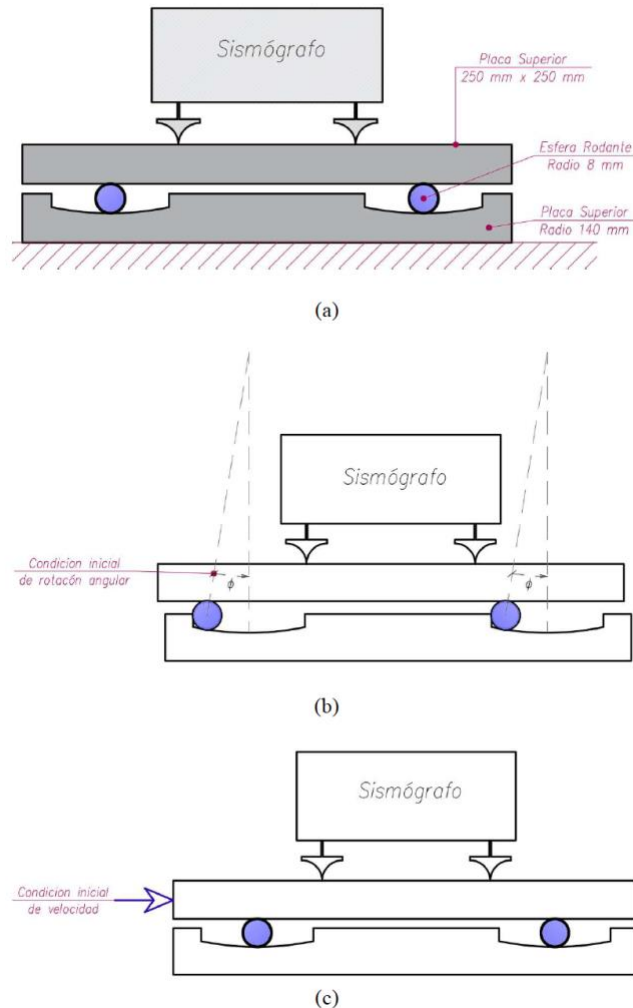


Figura XV. (a) -Esquema de toma de pruebas del equipo y el sistema, (b) Esquema para resultados a partir de posición inicial y (c) Esquema para resultados a partir de una velocidad inicial.

**4.3 Resultados obtenidos en las pruebas experimentales.** - Respecto a la parte experimental, se realizó dos mediciones, la primera, basada en la medición de microtrepidaciones y la limpieza de las mismas, se obtuvo el espectro de amplitudes, el cual, nos permite conocer el periodo (frecuencia) donde el sistema se excita (periodo predominante), y el segundo, un ensayo de medición de la respuesta del sistema bajo oscilaciones libres, considerando un desplazamiento como condición inicial.

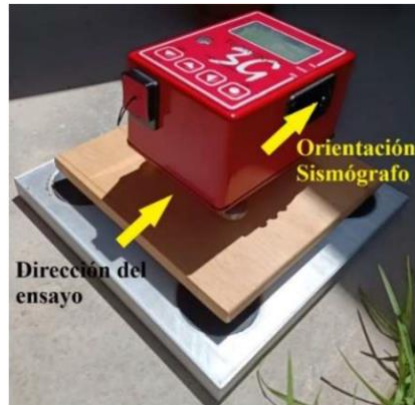
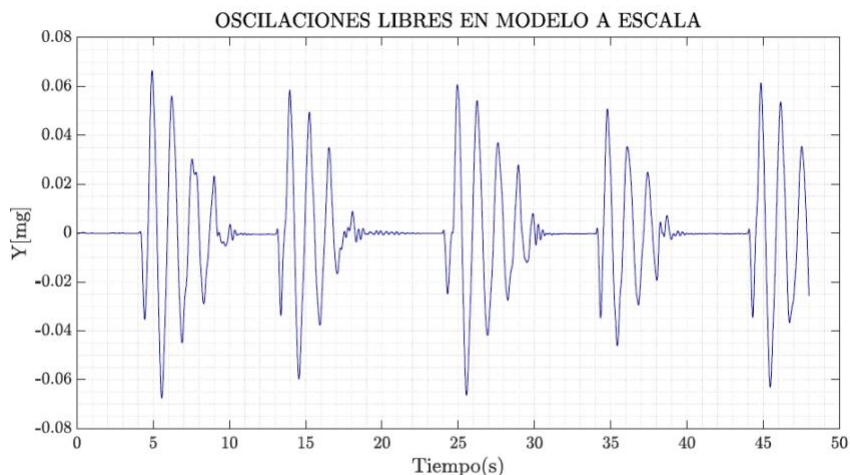
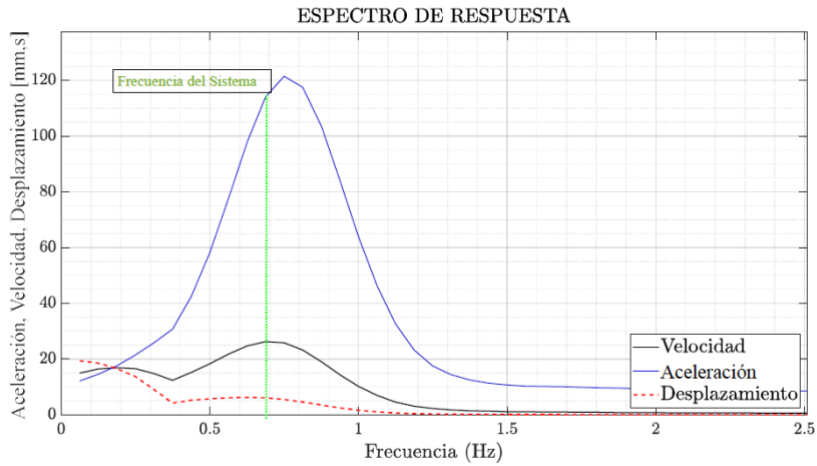


Figura XVI. Ensayo con sismógrafo en una dirección.

La primera medición, tuvo el objetivo de captar las microtrepidaciones, se realizó en un intervalo de 20 minutos con la finalidad de poder limpiar los datos de ruidos ambientales, la medición se realizó en una superficie plana y paralelamente se midió la misma cantidad de tiempo contraterreno (para la limpieza de datos). Respecto al registro de respuesta obtenido, aplicando la transformada de Fourier para estas señales periódicas (registro del sismógrafo), se obtuvo los espectros amplitud tanto para la aceleración, velocidad y desplazamiento, ver Figura XVII (b), el cual nos mostró la frecuencia del modo de vibración del sistema propuesto. La segunda medición fue realizada generando una condición inicial de rotación angular, para lograr ello se desplazó la plataforma superior hasta la máxima ubicación funcional de la esfera. Al ser liberado, el sistema osciló libremente hasta detenerse, el ejercicio se repitió 5 veces en el intervalo de 1 minuto, ver Figura XVII (a), dicha cinemática fue registrada por el sismógrafo, el cual nos permitió obtener las características dinámicas del sistema de aislamiento propuesto. Al graficar la data, se apreció las oscilaciones e identificó inicialmente algunos parámetros como la frecuencia predominante del sistema.



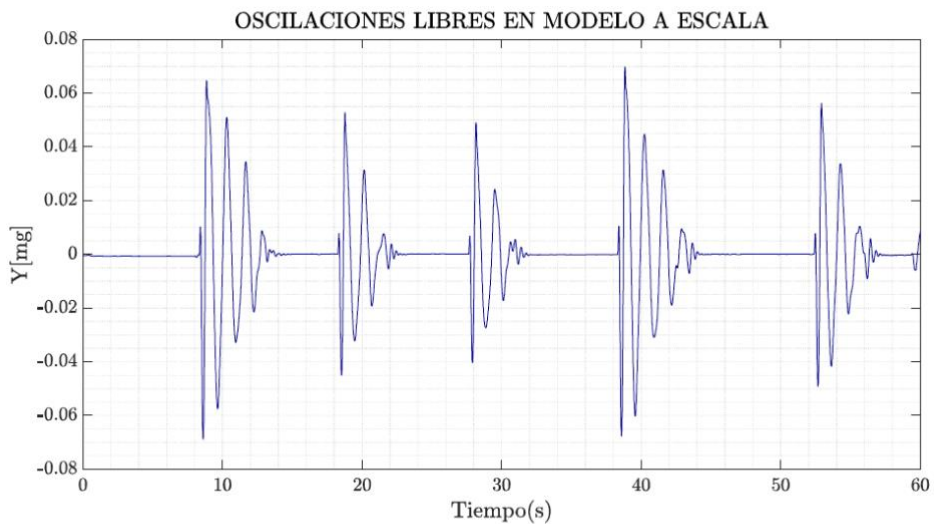
(a)



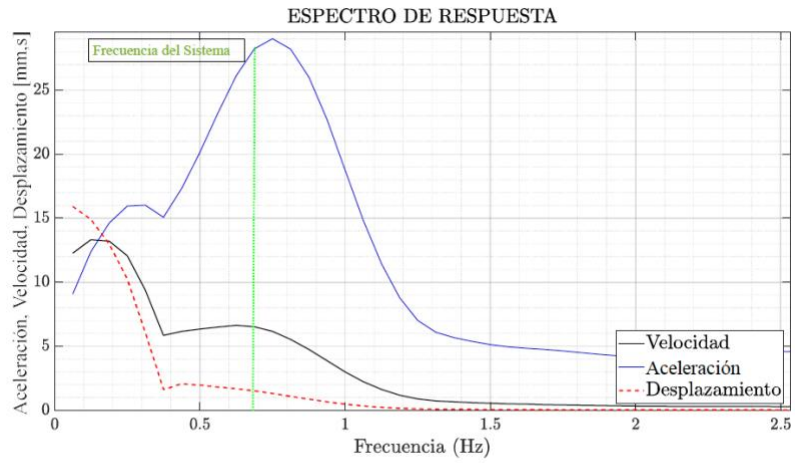
(b)

Figura XVII. (a) Registro del sismógrafo para el primer ensayo, (b) Espectro de amplitudes en desplazamiento, velocidad y aceleración.

Con la finalidad de corroborar la información obtenida, se repitió ambos ensayos, obteniendo resultados similares, ver Figura XVIII (a) y XVIII (b),



(a)



(b)

Figura XVIII. (a) Registro del sismógrafo para el segundo ensayo, (b) Espectro de amplitudes en desplazamiento, velocidad y aceleración.

**4.4 Comparación del modelo matemático y ensayos realizados.** - Las gráficas periódicas de las Figuras XVII(a) y XVIII(a), nos permitieron obtener el periodo predominante del sistema para los distintos ensayos realizados durante el tiempo del monitoreo, así como la razón de amortiguamiento crítico. Dichas gráficas tienen un comportamiento semejante, verificando que, tanto para el registro de respuesta como para el espectro de amplitudes, se tiene el mismo periodo y la misma razón de amortiguamiento. Las Figuras XVII(b) y XVIII(b), son espectros de amplitud, las cuales muestran la frecuencia del modo de vibración principal para el sistema ensayado: Rango cercano a los 0.70 Hz.

Finalmente se procedió a realizar la comparación entre los resultados obtenidos por el monitoreo estructural con sismógrafo y el modelo matemático implementado en Matlab para el espécimen del sistema de aislamiento propuesto, dicha comparación se expresa mediante la siguiente tabla.

Parámetros del espécimen	Sismógrafo		Matlab	Variación (%)
	Indicador	Periodo (s)	Periodo (s)	
R = 14.5cm, r=0.8cm y $\zeta = 5\%$	Espectro de amplitudes	1.408	1.48	5.1%
	Registro de respuesta	1.395		5.7%

Tabla II.- Comparativa de resultados obtenidos del modelo matemático y la práctica experimental.

Se realizó la comparación gráfica:

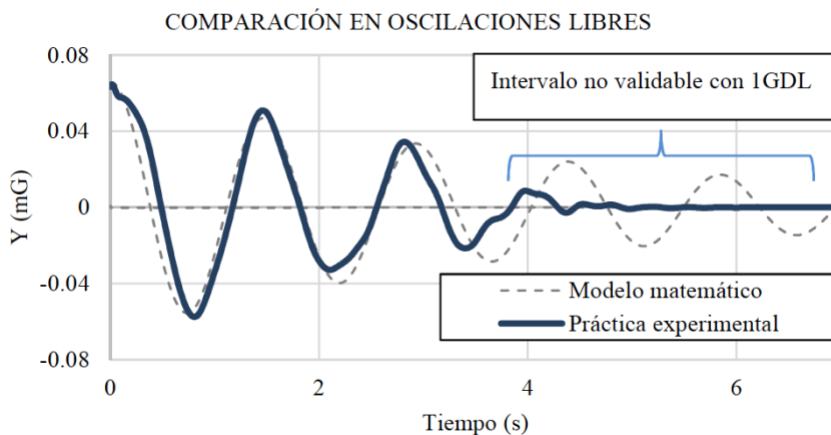


Figura XIX.- Comparativa en oscilaciones libres modelo matemático y la práctica experimental.

Considerando los resultados obtenidos del modelo matemático y la práctica experimental, se analizó la variación del periodo de vibración la cual llega a ser hasta el 5.70%. En la Figura XIX, tanto la respuesta del ensayo como la del modelo concuerdan en los tramos donde se comporta unidireccionalmente, sin embargo, para el tramo final difieren. La variación en el tramo final se debe a que la esfera al encontrarse cercano a su punto de estabilidad empieza a tener un comportamiento fuera del plano. Para validar este último tramo es necesario construir el modelo matemático del sistema desde una perspectiva tridimensional.

## 5. Conclusiones. –

- Se desarrolló un modelo matemático bajo un análisis dinámico para el sistema de aislamiento sísmico tipo esfera con la capacidad de trasladarse mediante la rotación en una superficie cóncava, donde el comportamiento del sistema de aislamiento es gobernado por ecuaciones diferenciales no lineales, las cuales fueron validadas de manera experimental.
- En base a los resultados obtenidos se tiene que el sistema es estable dinámicamente, esto se comprueba a través de los retratos de fase tanto para oscilaciones libres, así como para los sismos. Se apreció que a través del registro sismo, el sistema siempre tiende a acercarse a la posición angular de 0 rad y velocidad angular de 0 rad/s. Así mismo mediante el criterio de energía mínima potencial se demostró que el sistema se encuentra en equilibrio estable para la posición angular de 0 rad.
- Se concluye que la variación de la geometría en la superficie cóncava influye al periodo del sistema de manera directa. A mayor valor de R (Radio de la superficie cóncava), mayor periodo del sistema.
- Se concluye que la variación de la geometría en el radio del aislador influye al periodo del sistema de manera indirecta. A mayor valor de r (Radio de la esfera), menor periodo del sistema.
- Los resultados con un radio de esfera de 7.5cm, y una superficie de radio de 2.0m, utilizando como material el concreto, reduce considerablemente el costo de su fabricación que tomando en cuenta el material y la mano de obra es aproximadamente de S/500 por cada aislador propuesto, comparándolo con un sistema de aislamiento convencional el cual tiene un precio aproximado \$3000 (S/ 11550).
- Comparando el funcionamiento del aislador de bajo costo, con un Aislador convencional de Péndulo de fricción, se concluye que ambos sistemas funcionan a través de movimientos distintos, siendo que, el primero se desplaza a través de un movimiento de traslación y rotación, y el segundo solo se desliza.
- Se validó el sistema de aislamiento sísmico propuesto con un espécimen a escala 1:15, donde de manera cuantitativa se obtuvo una diferencia máxima de 5.7% entre el modelo matemático y el modelo experimental, siendo este valor aceptable para la validación del sistema.
- Se concluye que al someter el sistema diversos sismos como: Imperial Valley (USA), Ancash (Perú), Landers (USA), ChiChi (Taiwán), Kobe (Japón), Bucarest (Rumania), Loma Prieta (USA) y Northridge (USA), se observa una reducción de aceleración del 70%- 75%, comprobando la capacidad del sistema para reducir las aceleraciones a través del alargamiento del periodo, cumpliendo con la hipótesis de la investigación.

**5. Agradecimientos.** – Al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), por el apoyo financiero en la realización de este proyecto mediante el convenio 197-2020-FONDECYT.

## 7. Referencias

- [1] Bao, Y. y Becker, T, Three-dimensional double friction pendulum bearing model including uplift and impact behavior: Formulation and numerical example. *Engineering Structures*, 2019, vol. 199, p. 1-10.
- [2] Bethany, R. *Ring of Fire: An Encyclopedia of the Pacific Rim's Earthquakes, Tsunamis, and Volcanoes*, 2015, 1ra Edición. ABC-CLIO.LLC.
- [3] Cilsalar, H. y Constantinou, M. Behavior of a spherical deformable rolling seismic isolator for lightweight residential construction. *Bulletin of Earthquake Engineering* 17, 2019: p.4321–4345.
- [4] Cilsalar, H. y Constantinou, M. Earthquake Engineering to Extreme Events Development and Validation of a Seismic Isolation System for Lightweight Residential Construction, 2019, Technical Report Multidisciplinary and multi-hazard earthquake engineering research center – University at Buffalo.
- [5] Cilsalar, H. y Constantinou, M. Parametric study of seismic collapse performance of lightweight buildings with spherical deformable rolling isolation system. *Bulletin of Earthquake Engineering* 18, 2020: p.1475–1498.
- [6] de Luca, A. y Guidi, L. G. State of art in the worldwide evolution of base isolation design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 125, 2019: p. 1-13.
- [7] Enrique, A. y Becerra, E. Los desafíos para la construcción en el Perú, 2018, Camara Peruana de Comercio (CAPECO).
- [8] Foti, D. y Kelly, J. Experimental study of a reduced scale model seismically base isolated with Rubber-Layer Roller Bearer (RLRB), *European Earthquake Engineering*, 1996
- [9] Harvey, S. y Kelly, C. A review of rolling-type seismic isolation: Historical development and future directions, *Engineering Structures*, 2016, vol.125, p. 521–531
- [10] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Perú: Características de las viviendas particulares y los hogares Acceso a servicios básicos, 2018, Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.
- [11] Jampole, E., et al. Full-scale dynamic testing of a sliding seismically isolated unibody house, *Earthquake Spectra*, 2016, vol. 32, p. 2245–2270.
- [12] Jerry M. y Stephen T. *Classical Dynamics of Particles and Systems*, 2004, 5th Edition. Chris Hall.
- [13] Julio K. *Manual para la Reducción del Riesgo Sísmico de Viviendas en el Perú*, 2016, Ministerio de Vivienda y Construcción.
- [14] Karl Astrom y Richard M. *An introduction for scientists and engineers*, 2009, Version V.2.10b, Princeton University Press.
- [15] Katsamakas A. et al. Low-cost and sustainable seismic isolation with re-used tennis balls: Lateral cyclic tests. 3th European Conference on Earthquake Engineering & Seismology, 2022: p. 1- 10.
- [16] Katsamakas, A., et al Re-using tennis balls as low-cost seismic isolation devices: Experimental Investigation, 3th International Conference on Natural Hazards and Infrastructure, 2022.
- [17] Katsamakas, A., et al. Experimental investigation of spherical rubber seismic isolation bearings, 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2021.
- [18] Katsamakas, et al. Feasibility Study on Re-Using Tennis Balls as Seismic Isolation Bearings, *Frontiers in Built Environment*, 2021, vol. 7, p. 1-18.
- [19] Katsamakas, et al. Shake-table testing of low-cost seismic isolation bearings based on rolling rubber spheres, 3rd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure ,2022.
- [20] Kelly, J. y Takhirov, S. *Analytical and Experimental Study of Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators*, 2001, PEER Report.
- [21] Kelly, M. Seismic isolation systems for developing countries, *Earthquake Spectra* ,2002, vol. 18, p. 385–406.

- [22] Konstantinidis, D. y Kelly, J. Two Low-Cost Seismic Isolation Systems. 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012: p.1-9.
- [23] Masum, M. y Ali Akbar, M. The Pacific Ring of Fire is Working as a Home Country of Geothermal Resources in the World, 2nd International Geothermal Conference IOP Conference Series: Earth and Environmental Science vol. 249, 2019: p. 1 – 7.
- [24] Menga, N., Bottiglione, F. y Carbone, G. The nonlinear dynamic behavior of a Rubber-Layer Roller Bearing (RLRB) for vibration isolation, Journal of Sound and Vibration, 2019, vol. 463, p. 1-12.
- [25] Osgooei P., et al. Finite element analysis of unbonded square fiber-reinforced elastomeric isolators (FREIs) under lateral loading in different directions, Composite Structures, 2014, vol. 113, p. 164–173.
- [26] Roberto, V. Fundamental concepts of earthquake engineering, 2009, 1ra Edición. Taylor & Francis Group.LLC
- [27] Tsiavos, A. et al. Large-scale experimental investigation of a low-cost PVC ‘sand-wich’ (PVC-s) seismic isolation for developing countries. Earthquake Spectra EERI, 2020: p 1886–1911.
- [28] Xiao, H., Butterworth, J. W. y Larkin, T. Low-technology techniques for seismic isolation. New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2004: p. 1- 8.

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

YC ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

ES ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.



# Estimation of the Diffused Solar Irradiation on the Tilted Plane of Photovoltaic Solar Panels

*Estimación de la Irradiación Solar Difusa en el Plano Inclinado de Paneles Solares Fotovoltaicos*

*Estimativa da Irradiação Solar Difusa no Plano Inclinado de Painéis Solares Fotovoltaicos*

Muhammad Uzair<sup>1</sup>, Asad A. Naqvi<sup>2</sup>, Syed Umair H. Kazmi<sup>3</sup>

Recibido: 23/02/2023

Aceptado: 08/03/2023

**Summary.** - Solar energy, in the recent decades has gained a great attention due to its clean, simple and easy adaptable process. The effective utilization of solar energy is possible only if proper data of incident solar radiation is available. There are number of solar models based on different climatical factors, for the assessment of radiation on plane and sloped surfaces are available in the literature but the selection of best possible model is a challenging task. Here, different isotropic and anisotropic solar models have been utilized for the estimation of overall radiation incident on the sloped surface in Karachi then estimation was compared with the experimental values. The models selected for this study includes Liu and Jordan, Koronakis, Badescue, Hay and Davies, Temps and Coulson and HDKR. The predicted values and measured values are compared by using different statistical techniques like Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Mean Biased Error (MBE), Root Mean Square Error (RMSE) and t-stats. The outcomes revealed that isotropic models are more suitable model than the anisotropic models. Among all models, Badescue is the best suitable model for the estimation of radiations on sloped surfaces with lowest value of MBE, RMSE and t-stats while Temps and Coulson model, on the basis of MAPE, MBE, RMSE and t-stats is the most inappropriate correlation for the assessment of solar radiations on sloped surface. Overall, for the solar radiation estimation on any sloped plane in Karachi isotropic models have shown a good agreement.

**Keywords:** Solar energy, tilted surface, Karachi, Statistical techniques.

**Resumen.** - La energía solar, en las últimas décadas ha ganado una gran atención debido a su proceso limpio, simple y fácilmente adaptable. La utilización eficaz de la energía solar solo es posible si se dispone de datos adecuados de la radiación solar incidente. Hay varios modelos solares basados en diferentes factores climáticos, para la evaluación de la radiación en superficies planas e inclinadas están disponibles en la literatura, pero la selección del mejor modelo posible es una tarea desafiante. Aquí, se han utilizado diferentes modelos solares isotrópicos y

<sup>1</sup> Associate Professor, uzair@neduet.edu.pk, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Pakistan, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2033-6244>

<sup>2</sup> Lecturer, asadakhter@neduet.edu.pk, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Pakistan, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6290-3115>

<sup>3</sup> Lecturer, umairkazmi@neduet.edu.pk, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Pakistan, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2753-5393>

anisotrópicos para la estimación de la radiación total incidente en la superficie inclinada de Karachi y luego se comparó la estimación con los valores experimentales. Los modelos seleccionados para este estudio incluyen a Liu y Jordan, Koronakis, Badescue, Hay y Davies, Temps y Coulson y HDKR. Los valores pronosticados y los valores medidos se comparan utilizando diferentes técnicas estadísticas como el error porcentual absoluto medio (MAPE), el error sesgado medio (MBE), el error cuadrático medio (RMSE) y t-stats. Los resultados revelaron que los modelos isotrópicos son un modelo más adecuado que los modelos anisotrópicos. Entre todos los modelos, Badescue es el modelo más adecuado para la estimación de radiaciones en superficies inclinadas con el valor más bajo de MBE, RMSE y t-stats mientras que el modelo de Temps y Coulson, basado en MAPE, MBE, RMSE y t-stats es la correlación más inapropiada para la evaluación de las radiaciones solares en superficies inclinadas. En general, para la estimación de la radiación solar en cualquier plano inclinado en Karachi, los modelos isotrópicos han mostrado una buena concordancia.

**Palabras clave:** Energía solar, superficie inclinada, Karachi, Técnicas estadísticas.

**Resumo.** - A energia solar, nas últimas décadas, ganhou grande atenção devido ao seu processo limpo, simples e de fácil adaptação. A utilização efetiva da energia solar só é possível se dados adequados da radiação solar incidente estiverem disponíveis. Existem vários modelos solares baseados em diferentes fatores climáticos, para a avaliação da radiação em superfícies planas e inclinadas estão disponíveis na literatura, mas a seleção do melhor modelo possível é uma tarefa desafiadora. Aqui, diferentes modelos solares isotrópicos e anisotrópicos foram utilizados para a estimativa da radiação total incidente na superfície inclinada em Karachi, então a estimativa foi comparada com os valores experimentais. Os modelos selecionados para este estudo incluem Liu e Jordan, Koronakis, Badescue, Hay e Davies, Temps e Coulson e HDKR. Os valores previstos e os valores medidos são comparados usando diferentes técnicas estatísticas como Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE), Erro Viés Médio (MBE), Erro Quadrático Médio Raiz (RMSE) e t-stats. Os resultados revelaram que os modelos isotrópicos são modelos mais adequados do que os modelos anisotrópicos. Entre todos os modelos, Badescue é o modelo mais adequado para a estimativa de radiações em superfícies inclinadas com o menor valor de MBE, RMSE e t-stats, enquanto o modelo Temps e Coulson, com base em MAPE, MBE, RMSE e t-stats é o correlação mais inadequada para a avaliação de radiações solares em superfície inclinada. No geral, para a estimativa da radiação solar em qualquer plano inclinado em Karachi, os modelos isotrópicos mostraram uma boa concordância.

**Palavras-chave:** Energia solar, superfície inclinada, Karachi, técnicas estatísticas.

## Nomenclature

$\omega_s$ :	Sunset/Sunrise Hour angle
$\delta$ :	Declination angle
$\beta$ :	Collector angle with horizontal
$\varphi$ :	Latitude of location
$\rho$ :	Reflectivity of earth
$A$ :	Anisotropic index
$\bar{H}$ :	Monthly average daily solar radiations on horizontal surface
$\bar{H}_o$ :	Monthly average daily extra-terrestrial solar radiations on horizontal surface
$\bar{H}_b$ :	Beam or direct Radiations
$\bar{H}_d$ :	Diffuse radiations
$\bar{H}_T$ :	Radiation on tilted surface
$\bar{H}_{T,b}$ :	Beam or direct radiation on tilted plane
$\bar{H}_{T,d}$ :	Diffuse radiation on tilted plane
$\bar{H}_{T,r}$ :	Radiations received by the tilted plane after reflecting from the ground
MAPE:	Mean Absolute percentage error
MBE:	Mean Bias Error
$N$ :	Day of the year
$R_b$ :	Geometric factor
RMSE:	Root Mean Square Error
$S$ :	Cloud cover
$S_{max}$ :	Day length

**1. Background.** - Continuous depletion of fossil fuels and their escalating prices and also their contribution towards the greenhouse gas emissions [1], [2], forcing the developing nations like Pakistan to face not only financial deficit but also the problem of global warming. Pakistan, fulfills its power requirement by consuming around daily 135,201 barrels of oil which is being imported [3] which do not only cause the huge financial deficit but also results in global warming [4], [5]. In this scenario, it is ideal to look for renewable energy-based power generation systems to solve both financial as well as global warming problems.

Different researchers have explored the potential, opportunities and challenges of renewable energy systems like solar, wind, biomass, hydro and geothermal energy systems [6]–[14]. Among all other renewable energy systems, solar energy is considered to be the best because of its availability, simpler operation, minimal capital and operating cost [8], [15]. One can easily utilize solar energy for meeting the energy requirements only if there is a proper measurement of solar data on particular site which is essential for proper designing of solar devices. The solar data recording is time consuming and also causes the huge investment cost [16], [7]. Classification of solar radiations includes extra-terrestrial and terrestrial. Those radiations which are available outside the atmosphere or simply in space are termed as extra-terrestrial radiations, while terrestrial radiations are those that are received on the surface of the earth after passing through the layers of atmosphere. Extra-terrestrial radiations are calculated by using Klein's formula [17] while terrestrial radiations can't be calculated, they can be measured by using radiation measuring instruments or they can be predicted by utilizing various solar radiation empirical correlation [18].

The measurement of terrestrial radiations doesn't only consume a lot of time but also results in huge investment [19]. Alternate of measuring of solar radiation is the prediction of terrestrial radiation using different empirical correlations developed by different researchers. Variety of empirical correlations for estimation of solar radiations are available based on different climatic factors like sunshine hours, cloud cover, highest and lowest ambient temperature, humidity and others [20]. These empirical correlations predict the quantity of solar radiations incident at a particular by using the already measured data for that particular site.

Angstrom model [21] is considered to be the basic regression-based model, used for the prediction of monthly average daily terrestrial radiations on plane surface for a particular site, by considering the extra-terrestrial radiation, day length and average cloud of that particular site. Ahmad and Ulfat [22] have solved the first order as well as second order Angstrom model for the city of Karachi and presented there is only 5% error. It means that Angstrom model is found to be very good in approximating radiations for Karachi.

The terrestrial radiations that fall on any surface are basically composed of two components: beam and diffuse. Angstrom model only predicts the beam radiation. The prediction of diffuse radiation on any plane or horizontal plane is also very important for proper functioning of solar devices like photovoltaics and thermal collector. Solar devices are normally installed to face towards south and at an inclination equal to the location's latitude for maximum capturing of solar radiation [16]. The radiations that fall on tilted surface has three basic components; beam or direct radiation, scattered or diffuse radiation and the reflected radiation from ground. The beam radiation on horizontal surface can be predicted and then transformed on the tilted surface by using the simple geometrical relations. The diffuse radiations can be estimated by using different isotropic and anisotropic models [23]. The intensity of solar radiation in Isotropic models is assumed to be uniformly distributed over the entire sky dome. While anisotropic models assume anisotropy near circumsolar and isotropic in rest of the region. Maleki et al. [24] has reviewed various empirical equations for estimating solar radiations on inclined surfaces of different countries and determined the best possible correlations for the selected countries studied. Shukla et al. [23] has studied different isotropic and anisotropic models for Bhopal city of India, and found that Badescue model is the best suitable model for the approximation of solar radiations on sloped surfaces in Bhopal. Sebaili et al. [20] using statistical techniques evaluated that isotropic model for the approximation of solar radiations on sloped surfaces in Jeddah city gives more accurate results than the anisotropic models.

From above discussions, it is obvious that the adaptation of the most appropriate model for solar radiation estimation on sloped surface for a particular site is necessary to properly utilized the solar radiation. In our previous research [25], Hargreaves model was found to be the best suitable for the approximation of radiation on horizontal surface. In this paper, different isotropic and anisotropic solar models for approximation of solar radiation on tilted surface in Karachi have been studied. The approximation of solar radiation on sloped surface in Karachi from models have been done and compared with the experimental data. Statistical tools like MBE, RMSE, MAPE and t-stats have been used for the selection of the best suitable model for Karachi.

**2. Methodology.** - The site designated for the research is Karachi having the latitude of 24.86° N and longitude of 67.00° E and is located at the seashore. The average temperature of Karachi is 30° C [26]. Overall, the weather of Karachi is hot and humid.

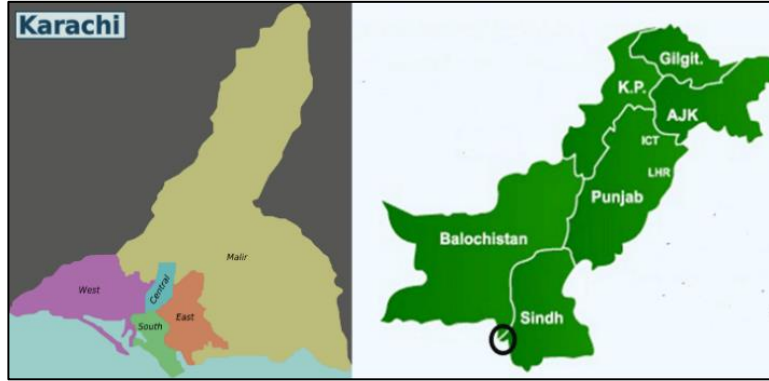


Figure 1.- Study location of Karachi  
Source of map: www.pc.gov.pk

The solar declination angle is computed by Coopers' formula [27]

$$\delta = 23.34 \sin \left( \frac{360}{365} (284 + N) \right) \quad (1)$$

Here, N is the average day of the month can be taken from [28].

$$\bar{H}_o = \frac{24}{\pi} \times G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360N}{365} \right) \times \left( \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s \right) \quad (2)$$

Here  $G_{sc}$  is known as solar constant  $1367 \text{ W/m}^2$ ,  $\omega_s$  is termed as sunset hour angle,  $\varphi$  is the location's latitude.

From latitude and declination angle, sunset hour angle is calculated by [28]

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (3)$$

Monthly average daily terrestrial radiation from Angstrom model [21] can be computed by:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = a + b \left( \frac{S}{S_{max}} \right) \quad (4)$$

Here S is the average cloud cover and  $S_{max}$  is the daylength can be computed by

$$S_{max} = \frac{2}{15} \omega_s \quad (5)$$

The Angstrom model for Karachi was first solved by Ahmed and Ulfat [22]

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = 0.324 + 0.405 \left( \frac{S}{S_{max}} \right) \quad (6)$$

The ration of  $\frac{S}{S_{max}}$  for every month is presented in table 1.

Month	$S/S_{max}$
January	$8.05 \times 10^{-1}$
February	$7.76 \times 10^{-1}$
March	$7.62 \times 10^{-1}$
April	$7.38 \times 10^{-1}$
May	$7.43 \times 10^{-1}$
June	$5.95 \times 10^{-1}$
July	$3.81 \times 10^{-1}$
August	$3.90 \times 10^{-1}$
September	$6.02 \times 10^{-1}$
October	$8.18 \times 10^{-1}$
November	$8.37 \times 10^{-1}$
December	$8.30 \times 10^{-1}$

Table 1. Ratio of  $\frac{S}{S_{max}}$  throughout the year for Karachi

The overall amount of radiations on any tilted surface is sub divided into direct or beam radiations, diffuse radiations and radiations reflected from ground.

$$\bar{H}_T = \bar{H}_{T,b} + \bar{H}_{T,d} + \bar{H}_{T,r} \tag{7}$$

Here,  $\bar{H}_T$  is the monthly average daily total radiation on sloped surface,  $\bar{H}_{T,b}$  is the beam radiation on sloped surface,  $\bar{H}_{T,d}$  is the diffuse radiation on sloped surface while  $\bar{H}_{T,r}$  is the radiation which is reflected from the ground and received by the sloped plane.

The beam or direct radiation on the tilted plane can be determined from the equation given below:

$$\bar{H}_{T,b} = \bar{H}_b R_b \tag{8}$$

Here,  $\bar{H}_b$  is the monthly average daily direct radiation on horizontal plane and is the difference of overall radiation on horizontal plane and scattered radiation on horizontal plane.  $R_b$  is termed as geometric factor and is defined as the ratio of direct radiation on sloped surface to that of the direct radiations on horizontal surface.

$$R_b = \frac{\sin \delta \sin(\theta - \beta) + \cos \delta \cos(\theta - \beta)}{\sin \delta \sin \theta + \cos \delta \cos \theta} \tag{9}$$

Diffuse radiations are that part of total radiation from sun, incident on the earth surface when its direction is changed because of scattering through the atmosphere. The direct solar radiation collides with different molecules present in the atmosphere, and due to tis diffusive reflection of

direct radiation, the radiation moves in different direction. These radiations can be received and recorded from sun rise to sunset. However, diffuse radiations are difficult to determine as their direction is highly variable.

Ground reflected radiation are those radiation which fall on the tilted after reflecting from any other surface like ground, trees, building and others. The view factor of the sloped surface facing the ground is  $F_{i-g} = (1 - \cos \beta) / 2$ . The reflected radiation on any sloped surface is given by

$$\bar{H}_{T,r} = \bar{H} \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (10)$$

Here,  $\bar{H}$  is the overall radiations on horizontal plane and  $\rho$  is defined as reflectiveness of ground. For dry soil  $\rho = 0.25$ , wet soil  $\rho = 0.12$ , snow cover  $\rho = 0.9$  and water surface  $\rho = 0.10$  [29]

Several different models for approximation of total radiation available on sloped surface are available. In our study, Liu and Jordan [30], Koronakis [31], Badescue [32], Temps and Coulson [33], Hay and Devies [34] and HDKR [35] have used for the approximation of solar radiations on tilted surface.

The total radiations on sloped surface from Liu and Jordan Model is given by

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b R_b + \bar{H}_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H}_g \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (11)$$

Solar radiations on tilted surface from Koronakis model are estimated by

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b R_b + \bar{H}_d \left( \frac{2 + \cos \beta}{3} \right) + \bar{H}_g \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (12)$$

Total radiations on tilted surface from Badescue model are estimated by

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b R_b + \bar{H}_d \left( \frac{3 + \cos 2\beta}{4} \right) + \bar{H}_g \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (13)$$

Temps and Coulson model is anisotropic model and solar radiations on any inclined surface are estimated by

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b R_b + \bar{H}_d \left\{ \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] (1 + \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z) \right\} + \bar{H}_g \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (14)$$

Hay and Devies model estimate the solar radiations on tilted surface by

$$\begin{aligned} \bar{H}_T &= (\bar{H}_b + \bar{H}_d A) R_b + \bar{H}_g \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + \\ &\bar{H}_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) (1 - A) + A R_b \end{aligned} \quad (15)$$

Here, A is termed as anisotropic index, and it depends upon the transmittance of atmosphere for beam radiations.

$$A = \frac{\bar{H}_{b,n}}{\bar{H}_{o,n}} = \frac{\bar{H}_b}{\bar{H}_o} \quad (16)$$

### 2.1 Techniques for model evaluation. -

The approximation of the solar energy (radiation) from the six models mentioned above, for Karachi has been done and then estimation is compared with the experimental data by using following statistical tools,

- MAPE
- MBE
- RMSE
- t-statistics

MAPE is a simple tool which is used to check how accurate the data is by just calculating the percentage of error and is given by:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\bar{H} - \bar{H}_P}{\bar{H}} \right) \times 100 \quad (17)$$

Here  $\bar{H}$  is the measured value,  $\bar{H}_P$  is the estimation while the total number of set-points is represented by n. The best result for MAPE is considered to be zero.

MBE shows the judgement of the real deviation between mean and estimated results. It gives evidence on longer period presentation and can be calculated by

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{H} - \bar{H}_P) \quad (18)$$

Here  $\bar{H}$  is the experimental value,  $\bar{H}_P$  is the predicted one, determined from the empirical equations. Zero is considered to be the ideal value for Mean Biased Error.

RMSE shows the judgement about how much deviation is present between measured and estimated values. It offers evidence on shorter-period presentation and is determined by

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{H} - \bar{H}_P)^2} \quad (19)$$



Here  $\bar{H}$  are experimental values, while  $\bar{H}_p$  are the predicted ones, determined from the above-mentioned empirical equations. The ideal value for RMSE is zero.

It is possible that MBE and RMSE may lead towards the poor model selection. The selection can be done by using t-statistics.

$$t - Stat = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (20)$$

**3. Results and Discussions.** - Solar declination angle is simply an angle formed between the ray of sunlight and the equator plane of the earth. Declination angle was computed from equation 1 and the trend of varying declination angle is presented in figure 2. From where, it is obvious that solar declination angle has the highest value June and is around 23° while the minimum value of -23° will occur in the month of December. In March and September, the declination angle will become zero which means that in these two months, sun is in such position that the sun ray is parallel to the equator line.

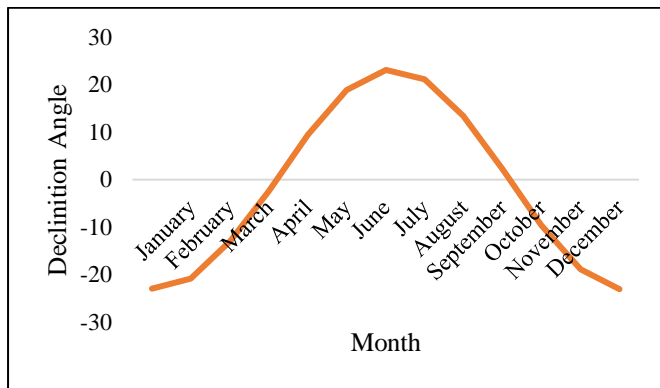


Figure II.- Declination angle variation in a year.

Extra-terrestrial radiations are those radiation which are received outside the earth surface. Extra-terrestrial radiation on horizontal surface in Karachi for the entire year was calculated from equation 2 and the variation is presented in figure 3. From figure 3, it is clear that the maximum amount of extra-terrestrial radiation will be received in the month of June and is around 11000 kWh.m<sup>2</sup>/day which means that if the atmosphere from Karachi has been evacuated then 11000 kWh.m<sup>2</sup>/day of radiation will be incident on the horizontal surface in Karachi. The minimum amount of extra-terrestrial radiation on horizontal plane will be incident in the month of December and is around 6300 kWh.m<sup>2</sup>/day. In June, generally the daylength is maximum that why maximum energy is available in the month of June while in the month of December day length is minimum due to which minimum energy is available in December.

The monthly average daily terrestrial radiations on tilted plane in the city Karachi determined from equation 11, 12, 13, 14, 16 and 18 and then compared with the experimental results. The tilt was set at 24.85° equivalent to the latitude of the city facing towards south to receive the maximum possible radiation on the inclined surface. The numbers obtained from solar models and experimental measurements are presented in figure 4. The maximum monthly average daily

terrestrial radiation that are incident on sloped surface is around  $1750 \text{ kWh.m}^{-2}/\text{day}$  in March and October while the minimum amount of  $138 \text{ kWh.m}^{-2}/\text{day}$  is available in July because in July mostly the weather is cloudy and sunshine hours are minimum in the month of July. The variation of global radiations on tilted surface in every month is shown figure 5. From figure 5, there is slight variation in the experimental values and the estimated values.

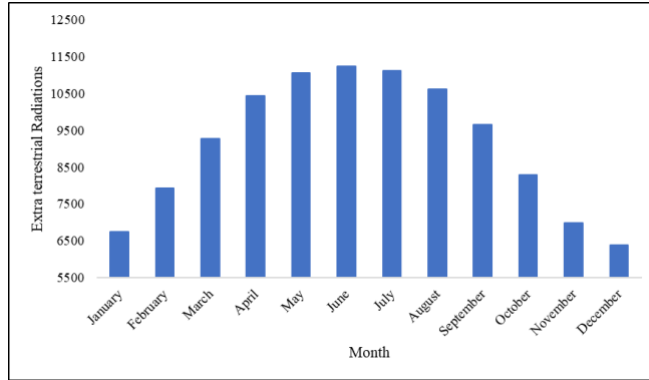


Figure III.- Variation of Horizontal radiation throughout the year.

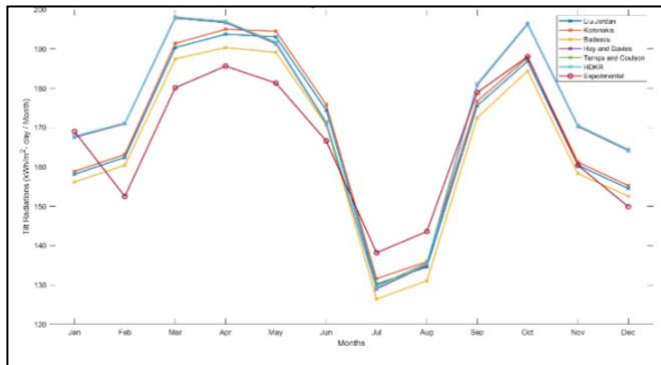


Figure IV.- Variation of total radiation on sloped throughout the year.

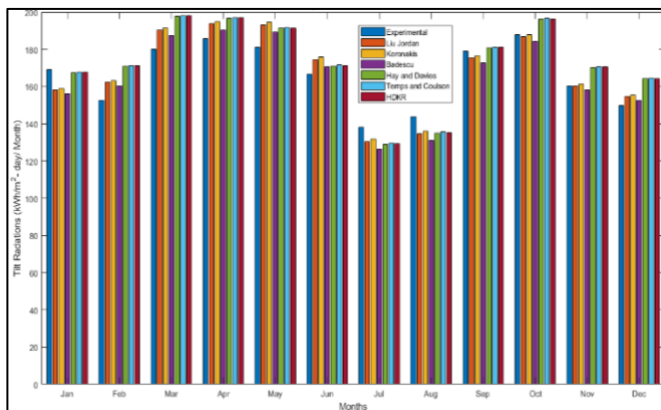


Figure V.- Month wise fluctuation of total solar energy on tilted area in Karachi.

For extraction of the best possible model for the approximation of overall solar energy on any inclined area in Karachi, statistical techniques have been used. The estimated values have compared against the measured values. MAPE of solar models with respect to the measured value was calculated from equation 18 and is presented in figure 6. From figure 6, it is clear that Liu and Jordan model has MAPE of 4.31%, Koronakis has 4.39%, Badescue has 4.33%, Hay and Davies has 5.88%, Temps and Coulson has 5.94% while HDKR has 5.93%. On the basis of MAPE, isotropic models are considered to be more precise than the anisotropic models with lower values of MAPE.

MBE of the solar models with respect to the experimental values have been calculated from equation 19 and is presented in figure 7. From figure 7, it is clear that Liu and Jordan model has MBE of 1.69 kWh.m<sup>-2</sup>per day Koronakis has 2.75 kWh.m<sup>-2</sup> per day , Badescue has -1.22 kWh.m<sup>-2</sup> per day Hay and Davies has 6.39 kWh.m<sup>-2</sup>per day Temps and Coulson has 6.75 kWh.m<sup>-2</sup>per day while HDKR has 6.58 kWh.m<sup>-2</sup>per day . On the basis of MBE, isotropic models are considered to be more accurate than the anisotropic models with lower values of MBE.

RMSE of the solar models with experimental measurements have been calculated from equation 20 and is presented in figure 8. From figure 8, it is clear that Liu and Jordan model has RMSE of 7.97 kWh.m<sup>-2</sup>per day , Koronakis has 8.30 kWh.m<sup>-2</sup>per day , Badescue has 7.85 kWh.m<sup>-2</sup>per day Hay and Davies has 10.9 kWh.m<sup>-2</sup>per day Temps and Coulson has 11.04 kWh.m<sup>-2</sup>per day while HDKR has 11 kWh.m<sup>-2</sup>per day . On the basis of RMSE, isotropic models give more accurate results than the anisotropic models with lower values of RMSE.

As discussed, MAPE, MBE and RMSE are not the enough tool to decide the best possible model, so, t-stats were also calculated from equation 21 to select the best possible model for approximation of total radiation on the sloped surface and is presented in figure 9. It is clear that Liu and Jordan model has t-stats of 0.72, Koronakis has 1.17, Badescue has 0.52 Hay and Davies has 2.4 Temps and Coulson has 2.56 while HDKR has 2.47. On the basis of t-stats, isotropic models are considered to be more correct than the anisotropic models with lower values of t-stats. Among all the models, Badescue model is the best with lowest value of t-stats.

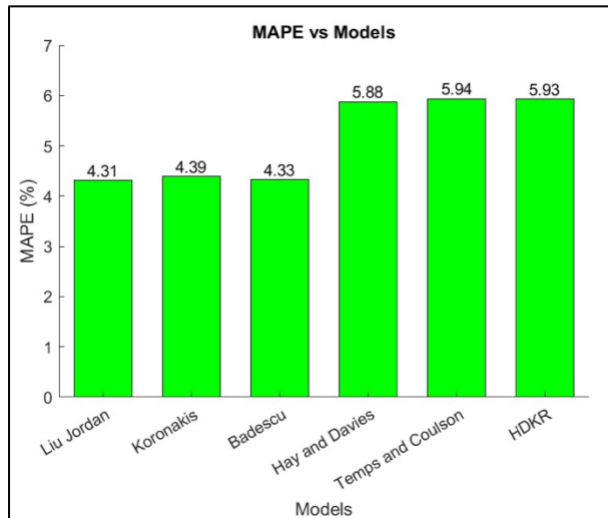


Figure VI.- MAPE of models in comparison of experimental data.

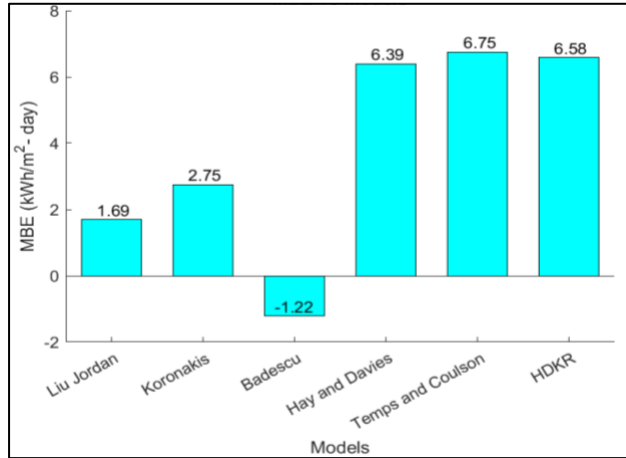


Figure VII.- MBE of models in comparison of experimental data.

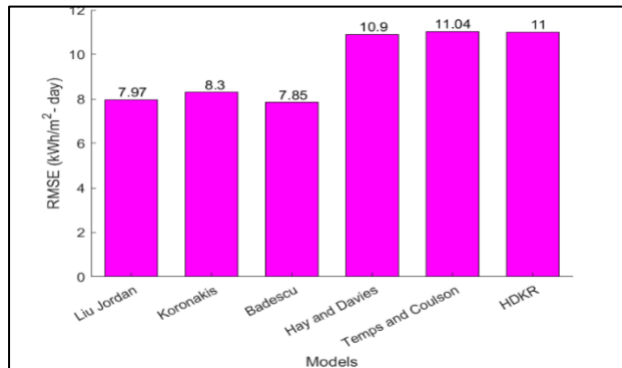


Figure VIII.- RMSE of models in comparison of experimental data.

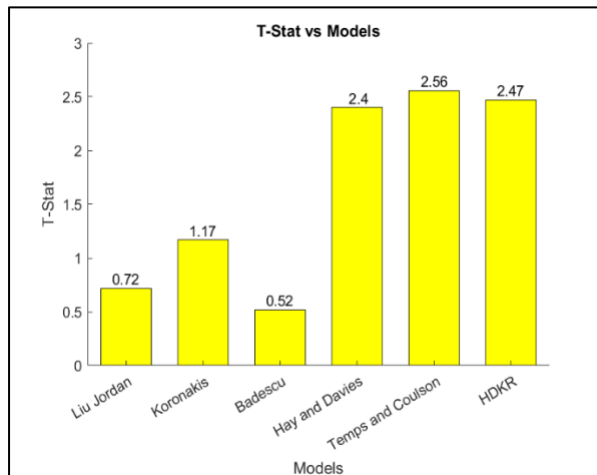


Figure IX.- t-stats of models in comparison of experimental data.

**4. Conclusions.** - The monthly-average daily solar energy on tilted plane in Karachi is experimentally determined and also predicted from the various solar models available. The approximated and measured data are compared by using statistical tools. Overall, isotropic models seem to be more accurate for approximation of radiation on sloped surface as compared to the anisotropic models. On the basis of MAPE, Liu and has shown the minimum deviation of -0.83% from the experimental measurements while maximum deviation was observed for Tempe and Coulson -3.86%. On the basis of MBE, Badescue model has shown the minimum error of -1.22 kWh.m<sup>2</sup>/day while the maximum error is observed for Temps and Coulson with 6.75 kWh.m<sup>2</sup>/day . Badescue model, also shows the minimal error on the basis of RMSE with 7.85 kWh.m<sup>2</sup>/day while Temps and Coulson show the maximum error of 11.04 kWh.m<sup>2</sup>/day . T-stats of all the models were also determined for the selection of best possible model. On the basis of t-stats, Badescue model is found to be the best model with the minimum value of 0.52 while Temps and Coulson is the utmost inappropriate model for estimation of solar radiation with the highest value of 2.56. Overall, isotropic models seem to be better models for the approximation of solar radiation on the tilted surface in Karachi with minimal errors.

## 5. References

- [1] A. Zecca and L. Chiari, “Fossil-fuel constraints on global warming,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 1, pp. 1–3, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.06.068.
- [2] C. McGlade and P. Ekins, “The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C,” *Nature*, vol. 517, no. 7533, pp. 187–190, 2015, doi: 10.1038/nature14016.
- [3] “Oil Import of Pakistan,” *Oil Import of Pakistan*.  
[https://www.worldometers.info/oil/pakistan-oil/#:~:text=as of 2016\).-,Oil Imports,barrels per day in 2016](https://www.worldometers.info/oil/pakistan-oil/#:~:text=as of 2016).-,Oil Imports,barrels per day in 2016)
- [4] Q. Z. Chaudhry, a Mahmood, K. W. Hyder, and Q. Dahe, “Glaciers and Glacial Lakes under Changing Climate in Pakistan,” *Pakistan J. Meteorol.*, vol. 8, no. 15, pp. 1–8, 2011.
- [5] G. Naheed and G. Rasul, “Projections of Crop Water Requirement in Pakistan under Global Warming,” *Pakistan J. Meteorol.*, vol. 7, no. 13, pp. 45–51, 2010.
- [6] A. A. Naqvi, A. Ahmed, M. Jamal, A. Majeed, A. Khizar, and B. Shaheer, “Performance Evaluation of Hybrid PVT Air Collector. A Comparative Approach,” *GMSARN Int. J.*, vol. 16, no. 2, pp. 121–127, 2022.
- [7] A. Alazazmeh, A. Ahmed, M. Siddiqui, and M. Asif, “Real-time data-based performance analysis of a large-scale building applied PV system,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 15408–15420, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.11.057.
- [8] A. N. Asad, A. Ahmed, and T. Bin Nadeem, “Efficiency Improvement of Photovoltaic Module by Air Cooling,” *Appl. Sol. Energy (English Transl. Geliotekhnika)*, vol. 57, no. 6, pp. 517–522, 2021, doi: 10.3103/S0003701X21060049.
- [9] A. A. Naqvi, T. Bin Nadeem, A. Ahmed, M. Uzair, and S. A. A. Zaidi, “Techno-economic design of a grid-tied Photovoltaic system for a residential building,” *Adv. Energy Res.*, vol. 8, no. 1, pp. 59–71, 2021, doi: 10.12989/eri.2021.8.1.059.
- [10] A. A. Naqvi, T. Bin Nadeem, A. Ahmed, and A. Ali Zaidi, “Designing of an off-grid Photovoltaic system with battery storage for remote location,” *Tecciencia*, vol. 16, no. 31, pp. 15–28, 2021, doi: 10.18180/tecciencia.2021.31.2.
- [11] A. Razmjoo, L. Gakenia Kaigutha, M. A. Vaziri Rad, M. Marzband, A. Davarpanah, and M. Denai, “A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO2 emissions in a high potential area,” *Renew. Energy*, vol. 164, pp. 46–57, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.042.
- [12] M. Ahmed, A.; Naqvi, A. A.; Bin, T.; Uzair, “Experimental Investigation of Dust Accumulation on the Performance of the Photovoltaic Modules : a Case Study of Karachi , Pakistan,” *Appl. Sol. Energy*, vol. 57, no. 5, pp. 370–376, 2021, doi: 10.3103/S0003701X21050029.
- [13] S. Adnan, A. Hayat Khan, S. Haider, and R. Mahmood, “Solar energy potential in Pakistan,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 3, 2012, doi: 10.1063/1.4712051.
- [14] T. Bin Nadeem, A. A. Naqvi, and A. Ahmed, “Suitable Site Selection for Ocean Thermal

- Energy Conversion (OTEC) systems – A case study for Pakistan,” *Tecciencia*, vol. 33, no. 17, pp. 35–48, 2022, doi: 10.18180/tecciencia.2022.33.4.
- [15] A. Ahmed *et al.*, “Investigation of PV utilizability on university buildings: A case study of Karachi, Pakistan,” *Renew. Energy*, vol. 195, pp. 238–251, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.06.006.
- [16] G. N. Tiwari and M. J. Ahmad, “Optimization of Tilt Angle for Solar Collector to Receive Maximum Radiation,” *Open Renew. Energy J.*, vol. 2, no. 1, pp. 19–24, 2009, doi: 10.2174/1876387100902010019.
- [17] S. A. Klein, “Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces.,” vol. 19, pp. 325–329, 1976.
- [18] F. Besharat, A. A. Dehghan, and A. R. Faghih, “Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 798–821, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.043.
- [19] M. Sengupta, Y. Xie, A. Lopez, A. Habte, G. Maclaurin, and J. Shelby, “The National Solar Radiation Data Base (NSRDB),” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 89, no. March 2018, pp. 51–60, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.003.
- [20] A. A. El-Sebaai, F. S. Al-Hazmi, A. A. Al-Ghamdi, and S. J. Yaghmour, “Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 568–576, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.06.032.
- [21] O. F. Soi, “Solar and atmospheric distillation,” *Sol. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 195–201, 1963, doi: 10.1016/0038-092x(63)90167-1.
- [22] F. Ahmad and I. Ulfat, “Empirical models for the correlation of monthly average daily global solar radiation with hours of sunshine on a horizontal surface at Karachi, Pakistan,” *Turkish J. Phys.*, vol. 28, no. 5, pp. 301–307, 2004.
- [23] K. N. Shukla, S. Rangnekar, and K. Sudhakar, “Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface: A case study for Bhopal, India,” *Energy Reports*, vol. 1, pp. 96–103, 2015, doi: 10.1016/j.egy.2015.03.003.
- [24] S. A. M. Maleki, H. Hizam, and C. Gomes, “Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: Models re-visited,” *Energies*, vol. 10, no. 1, 2017, doi: 10.3390/en10010134.
- [25] M. A. Muhammad Uzair, Asad A. Naqvi, “Statistical Approach to select the Best Suitable Solar Model for Global Radiation : Case Study of Karachi , Pakistan,” *Tecciencia*, vol. 17, no. 32, pp. 17–28, 2022.
- [26] “Weather, Karachi.” <https://www.weather-atlas.com/en/pakistan/karachi-climate>
- [27] B. W. SCOTT, “the Absorption of Radiation in Bone,” *Australas. Radiol.*, vol. 4, no. 2, pp. 129–132, 1960, doi: 10.1111/j.1440-1673.1960.tb01091.x.
- [28] W. A. Duffie, J. A., & Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons., 2013.

- [29] T. Muneer, *Solar radiation and daylight models*. 2007.
- [30] R. C. Liu, B. Y., & Jordan, “The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation,” *Sol. Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 1–19, 1960.
- [31] P. S. Koronakis, “On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area,” *Sol. Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 217–225, 1986, doi: 10.1016/0038-092X(86)90137-4.
- [32] H. Bulut and O. Büyükalaca, “Simple model for the generation of daily global solar-radiation data in Turkey,” *Appl. Energy*, vol. 84, no. 5, pp. 477–491, 2007, doi: 10.1016/j.apenergy.2006.10.003.
- [33] P. G. McCormick and H. Suehrcke, “Diffuse fraction correlations,” *Sol. Energy*, vol. 47, no. 4, pp. 311–312, 1991, doi: 10.1016/0038-092X(91)90123-E.
- [34] J. E. Hay, “Calculation of the solar radiation incident on inclined surfaces,” 1978.
- [35] P. S. Koronakis, “On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area,” *Sol. Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 217–225, 1986.

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

MU ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

AAN ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

SUHK ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.



# Identificación de áreas de mejora para evitar retrasos en proyectos de construcción en Perú

*Identification of areas for improvement to avoid delays in construction projects in Peru*

*Identificação de áreas de melhoria para evitar atrasos em projetos de construção no Peru*

Hugo A. Ccama Condori<sup>1</sup>, Marxia K. Herrera Quispe<sup>2</sup>, Luz V. Panca Humpiri<sup>3</sup>

Recibido: 24/02/2023

Aceptado: 24/04/2023

**Resumen.** - La industria de la construcción es uno de los motores principales de la economía en países en desarrollo. En los últimos años en el Perú, se ejecutaron muchos proyectos para cerrar las brechas de infraestructura. No obstante, muchos de estas obras experimentaron retrasos. El objetivo de investigación es identificar las principales causas de retrasos de proyectos públicos y privados del Perú, a partir de la percepción del consultor, contratista y propietario, para luego plantear estrategias de respuesta. Se utilizaron encuestas para recabar información de 57 expertos, que consta de 16 consultores, 28 contratistas y 13 propietarios, se identificaron las causas en función del índice de importancia, severidad y frecuencia. Se encontró en proyectos públicos, como causas principales a la deficiente planificación y programación del proyecto del contratista, dificultades en la financiación del proyecto del contratista y al retraso en el pago al contratista; en proyectos privados, deficiente planificación y programación del proyecto del contratista, cambio de ordenes al contratista y mala comunicación y coordinación del contratista; de acuerdo a grupos, tanto en proyectos públicos y privados el factor principal está relacionado con los contratistas, así mismo los contratistas y propietarios tienden a culparse mutuamente por los retrasos.

**Palabras clave:** Construcción, proyectos públicos, proyectos privados, causas de retrasos, Perú.

**Summary.** - *The construction industry is one of the main drivers of the economy in developing countries. In recent years in Peru, many projects have been implemented to close infrastructure gaps. However, many of these works experienced delays. The objective of this research is to identify the main causes of delays in public and private projects in Peru, based on the perception of the consultant, contractor and owner, in order to propose response strategies. Surveys were used to collect information from 57 experts, consisting of 16 consultants, 28 contractors and 13 owners, the causes were identified according to the index of importance, severity and frequency. In public*

---

<sup>1</sup> Mag. En Gerencia en la Construcción. Instituto de Investigación en Arquitectura y Construcción UNA - PUNO, hccama@unap.edu.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2886-7901>

<sup>2</sup> Mag. En Gerencia en la Construcción. Instituto de Investigación en Arquitectura y Construcción UNA - PUNO, Aixram17@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4473-6987>

<sup>3</sup> Mag. En Gerencia en la Construcción. Instituto de Investigación en Arquitectura y Construcción UNA - PUNO, vaneph07@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2713-743X>

*projects, the main causes were found to be poor planning and scheduling of the contractor's project, difficulties in financing the contractor's project and delay in payment to the contractor; in private projects, poor planning and scheduling of the contractor's project, change of orders to the contractor and poor communication and coordination of the contractor; according to groups, in both public and private projects the main factor is related to the contractors, and contractors and owners tend to blame each other for the delays.*

**Keywords:** *Construction, public projects, private projects, causes of delays, Peru.*

**Resumo.** - *A indústria da construção é um dos principais motores da economia dos países em desenvolvimento. Nos últimos anos, no Peru, muitos projetos foram realizados para fechar lacunas de infraestrutura. No entanto, muitas dessas obras sofreram atrasos. O objetivo da pesquisa é identificar as principais causas de atrasos em projetos públicos e privados no Peru, com base na percepção do consultor, empreiteiro e proprietário, para então propor estratégias de resposta. Foram utilizadas pesquisas para coletar informações de 57 especialistas, sendo 16 consultores, 28 empreiteiros e 13 proprietários, as causas foram identificadas com base na importância, gravidade e índice de frequência. Nas obras públicas, foram identificadas como principais causas deficiência de planejamento e programação do projeto da empreiteira, dificuldades de financiamento da obra da empreiteira e atraso no pagamento à empreiteira; em projetos privados, planejamento e programação deficiente do projeto do empreiteiro, alteração de pedidos ao empreiteiro e má comunicação e coordenação do empreiteiro; Segundo grupos, tanto em projetos públicos quanto privados o principal fator está relacionado aos empreiteiros, da mesma forma que empreiteiros e proprietários tendem a se culpar pelos atrasos.*

**Palavras-chave:** *Construção, projetos públicos, projetos privados, causas de atrasos, Peru.*

**1. Introducción.** - Los retrasos en la ejecución de proyectos de construcción son comunes y es un fenómeno mundial [1]. Los retrasos en el tiempo y los sobrecostos se encuentran entre los fenómenos más frecuentes en el sector construcción [2]. Las consecuencias de los retrasos no solo repercuten en el sector construcción, sino que, influyen en la economía general de un país [3]. Arantes et al. [4] indican que "la terminación oportuna de un proyecto, es considerado como el indicador principal que mide el éxito de los proyectos". Sin embargo los retrasos en la entrega de los proyectos son recurrentes en la construcción y complica a las partes contractuales, particularmente en los países en desarrollo [5], y el Perú no es la excepción, donde casi el 80% de los proyectos contratados experimentan retrasos y sobrecostos. En ese sentido los retrasos socavan negativamente los proyectos de construcción, independientemente de la situación socioeconómica del país de que se trate [6].

El retraso es un riesgo frecuente en los proyectos de construcción, suele ser el resultado de un evento que debe gestionarse mediante un proceso adecuado para minimizar su impacto; la gestión sistemática del retraso durante la ejecución de los proyectos de construcción garantiza que la causa de ese retraso se identifique y documente lo antes posible, con la finalidad de tomar las acciones para evitarla [7]. El retraso es perjudicial tanto para el propietario como para el contratista; para el caso del propietario, los retrasos conducen a pérdidas de los ingresos potenciales por el uso del proyecto, aumentan los gastos generales relacionados con la gestión del proyecto y aumentan los costos de supervisión del contrato; en el caso del contratista, los retrasos también generan costos mayores debido a períodos de trabajo más prolongados, y como efecto se incrementa el costo de materiales, mano de obra y el incremento de gastos generales [8]. Estos retrasos ocurren en los proyectos de construcción debido a muchos variables (causas) que resultan de muchos factores interrelacionados [9].

El sector construcción en el estado peruano se ha convertido a partir de las últimas décadas, como uno de los sectores más dinámicos que permitió mejorar la economía del país; representa el 6% del PBI nacional, cuya tasa de crecimiento es alrededor del 7% [10], del mismo modo la Cámara de Comercio de Lima, reporta el 6.7% del PBI nacional (US \$16,500) [11]. Como resultado de este crecimiento, se han lanzado muchos proyectos de construcción a diversas escalas para desarrollar las instalaciones de infraestructura básica del país. Estos proyectos incluyen la construcción de carreteras, caminos, represas, colegios, hospitales, proyectos de saneamiento y edificios de viviendas, de iniciativa pública y privada. Uno de los problemas a los que se enfrentan estos proyectos de construcción son los retrasos prolongados para los que la industria de construcción del Perú, presenta una serie de limitaciones de orden técnico, administrativo y legal. En ese contexto es importante identificar los factores causales que originan estos retrasos en la ejecución de los proyectos de construcción, con el propósito de generar estrategias de respuesta adecuados para gestionar y minimizar los impactos.

Es necesario mencionar que los proyectos de construcción a nivel mundial tienen características análogas, tal como se muestra en los estudios internacionales, sin embargo en algunos países en desarrollo los retrasos de construcción son muy específicos [12]. En este contexto, Mpofu et al. [13] opinan que los factores de retraso son específicos de cada país y están influenciados por los antecedentes socioeconómicos y culturales. En ese marco se busca explorar las causas de retraso de construcción en el Perú, teniendo en consideración, de que no se tiene información sobre las causas reales de los retrasos, debido a que se tiene escasos estudios realizados, por lo que se hace necesario investigar, debido a que el problema es persistente y recurrente en los proyectos. El presente trabajo tiene como objetivos:

- Identificar las causas principales de retrasos en proyectos públicos y privados en el Perú, a partir de la percepción de los propietarios, contratistas y consultores.
- Plantear estrategias de respuesta con el fin de minimizar los retrasos en los proyectos.

**2. Revisión de literatura.-** Debido a los escasos estudios en el Perú, se han revisado estudios especializados a nivel internacional, donde existen numerosas investigaciones. El retraso en proyectos de construcción es un tema importante que ha inspirado a muchos investigadores a estudiarlo desde diferentes puntos de vista. Presentamos, a continuación, una revisión de algunos estudios realizados sobre las causas del retraso en diferentes países. Assaf y Al-Hajj [8] identificaron 73 causas de retraso en diferentes tipos de proyectos públicos y privados relacionados a edificaciones de mediana complejidad en Arabia Saudí; estudiaron diferentes causas a partir de la importancia del retraso, enfocándose en las percepciones desde las opiniones de los contratistas, consultores y propietarios; las causas principales encontradas en el estudio fueron: cambio de órdenes por parte del propietario, demora en el pago, planificación y programación ineficaces por parte del contratista, escasez de mano de obra y dificultades de financiamiento por parte del contratista. Al Momani [14] estudio los retrasos de construcción en Jordania, con dicho propósito realizo encuestas en 130 proyectos públicos, relacionados a edificios residenciales, oficinas, colegios, centros médicos, encontrando como causas de retraso: diseño deficiente y negligencia del propietario, cambio de órdenes, condiciones climáticas, condiciones del sitio, retraso en la entrega de materiales, condiciones económicas y aumento de cantidades.

Alaghbari et al.[15] realizaron el estudio sobre retrasos en proyectos de edificios de gran envergadura en Malasia, encontrando las siguientes causas: complicaciones financieras del propietario por problemas económicos, problemas financieros del contratista, lentitud de los consultores en la supervisión de las obras, la toma de decisiones, la ineficiencia de los consultores en la emisión de instrucciones y la escasez de materiales en el mercado; el estudio muestra una mayor comprensión de los problemas que contribuyen a los retrasos, debido a que utilizaron escalas de frecuencia, sin embargo el estudio solo se limitó a identificar y no llegaron a analizar la importancia de la causa; para cerrar estas brechas, el presente estudio enfoca las causas de los retrasos a partir de la valoración del índice de importancia que se calcula en base al índice de frecuencia y severidad. Más tarde en Egipto estudiaron los retrasos en proyectos grandes de edificaciones, encontraron que los problemas financieros de un contratista era el más crítico [16]. En la Franja de Gaza en Palestina en un estudio de grandes proyectos, identificaron un conjunto diferentes causas, como el cierre de puestos de control en la frontera e insuficiencia en el suministro de materiales de construcción, que pueden atribuirse al entorno político de la región [17]. Analizando proyectos de construcción en India, Doloi et al.[18] informó que uno de los factores más críticos de la demora del proyecto es la falta de compromiso en proyectos grandes. Akogbe et al. [19] estudio retrasos en proyectos de edificaciones de mediana envergadura, encontrando como causas de retraso considerando la severidad y frecuencia, a la situación financiera limitada de los contratistas, los problemas financieros de los propietarios y el desempeño deficiente de los subcontratistas.

En Ecuador [20]. Estudiaron las causas de retraso en proyectos de edificaciones, para dicho propósito aplicaron encuestas a los contratistas para evaluar la importancia relativa de las causas del retraso, donde encontraron que la planificación incorrecta, el financiamiento y pagos de obra terminada de parte del cliente, falta de comunicación entre las partes, experiencia inadecuada del contratista y toma de decisiones lenta por parte de los propietarios, se encuentran entre las primeras causas importantes de retrasos. En Colombia [21] realizaron un estudio en la ciudad de Neiva en proyectos públicos de mediana envergadura, encontrando como causa de retrasos a las órdenes de cambios por el ente público contratante, cambios constructivos, diferencias en las condiciones de campo, condiciones atmosféricas desfavorables, aceleración de trabajo (pérdida de productividad), Suspensión del trabajo, error al cotizar los precios de materiales y equipos, errores en el expediente técnico e irregularidades en la contratación. En Perú un estudio sobre retrasos en proyectos públicos a partir de los contratistas, encontró como causas de retrasos para proyectos de saneamiento a problemas de disponibilidad de terrenos, aprobación de documentos de modificaciones de obra y rediseño debido a cambios en el diseño técnico original [22]

**3. Materiales y métodos.** Se revisó la literatura especializada internacional, principalmente estudios realizados en países en desarrollo, por la similitud con el Perú. Se identificó una lista de 54 causas de retrasos para proyectos públicos y privados, clasificados en 9 categorías a partir del autor Assaf y Al-Hajj [8]. En base a esta información se desarrolló un cuestionario para identificar las causas de retrasos a partir de las percepciones de los propietarios, contratistas y consultores. La información de los contratistas y consultores se recolectó del registro de la Cámara Nacional de Comercio y el Organismo Supervisor de Contrataciones del Estado (OSCE). Los informantes incluyeron a propietarios de empresas, gerentes de proyecto, ingenieros consultores y personal clave. Para la identificación de las causas de retraso se analizaron los datos mediante índices de frecuencia, severidad e importancia, para luego enfatizar en las recomendaciones donde se plantean estrategias para minimizar los retrasos. El alcance de esta investigación incluye infraestructura pública (hospitales, colegios, edificios del gobierno). Así mismo en proyectos privados, incluye edificios de viviendas multifamiliares, edificios de oficinas de mediana envergadura.

**3.1. Diseño del cuestionario.** El cuestionario elaborado consta de dos partes. La primera está relacionada con la información general del encuestado, se solicitó a los informantes que respondieran preguntas relacionadas con su edad, nivel de educación, experiencia y su opinión respecto al porcentaje promedio de retraso en los proyectos. La segunda parte contiene la lista completa de las causas, clasificadas en 9 grupos: Factores relacionados con el proyecto, propietario, contratista, consultor, equipo de diseño, materiales, equipos, mano de obra y factores externos. Para cada causa se realizaron dos preguntas: ¿Cuál es la frecuencia de ocurrencia de esta causa? y ¿cuál es el grado de severidad de esta causa? La frecuencia de ocurrencia tiene valoraciones de: siempre, casi siempre, a veces y rara vez (en escala de 4 a 1). De la misma forma, el grado de severidad se valora como: extrema, mucha, moderada y baja (en escala de 4 a 1).

**3.2. Enfoque de análisis de datos.** - Para clasificar las diferentes causas de retraso, desde la percepción de los propietarios, contratistas y consultores, se analizaron los datos recopilados a través del índice de importancia, este se calcula en función de los índices de frecuencia y severidad. Los datos se analizaron a través de las ecuaciones 1, 2, 3 y 4, en concordancia con [8].

$$\text{Indice de Frecuencia} = \frac{1}{4} \times \sum_{i=1}^4 W_{fi} \times \frac{n_i}{N} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Dónde “ $W_{fi}$ ” es la ponderación constante dada a cada respuesta (1 para rara vez hasta 4 para siempre), “ $n_i$ ” es la respuesta frecuente y “ $N$ ” el número total de respuestas.

$$\text{Indice de Severidad} = \frac{1}{4} \times \sum_{i=1}^4 W_{Si} \times \frac{n_i}{N} \times 100 (\%) \quad (2)$$

Dónde “ $W_{Si}$ ” es la ponderación constante dada a cada respuesta (1 para baja hasta 4 para extrema), “ $n_i$ ” es la respuesta frecuente y “ $N$ ” el número total de respuestas.

$$\text{Indice de Importancia} = [(F(\%) \times S(\%)] / 100 (\%) \quad (3)$$

Además se analizó la fuerza de relación entre las clasificaciones utilizando la correlación de Spearman. La Ecuación (4) calcula el coeficiente de Spearman (Corder y Foreman, 2014):

$$r_s = 1 - [(6 \sum d^2) / (n^3 - n)] \quad (4)$$

Donde “ $d$ ” es la diferencia entre rangos y “ $n$ ” es el número de clasificaciones.

## 4. Resultados

**4.1. Características de los encuestados.** - Se distribuyeron 250 cuestionarios de forma electrónica a profesionales del rubro de la construcción, incluidos propietarios (promotores inmobiliarios del sector privado y representantes de instituciones del sector público), Consultores (arquitectos e ingenieros) y contratistas (empresas constructoras). Respondieron un total de 57 cuestionarios, que incluyen 13 propietarios, 28 contratistas y 16 consultores. La Tabla I, muestra la tasa de respuesta de propietarios, contratistas y consultores de 22.81%, 49.12% y 28.07%, respectivamente; así mismo el 43.86% de los encuestados tienen entre 20 y 30 años de edad, el 56.14 % tiene menor a 10 años de experiencia en proyectos de construcción, mientras que el 17.54% superan los 20 años como experiencia en el sector. El espectro de los encuestados, refleja la situación actual del sector construcción en el Perú, donde se tiene un porcentaje importante de jóvenes profesionales laborando en el rubro; esto es concordante con estudios similares realizados en Ecuador y Colombia, donde los encuestados fueron profesionales jóvenes con 3 años a más como experiencia [20].

Características	Participantes	Frecuencia (N=57)	Porcentaje (%)
Agente	Propietario	13	22.81
	Contratista	28	49.12
	Consultor	16	28.07
Edad	20 - 30	25	43.86
	31 - 40	17	29.82
	> 40	15	26.32
Nivel de educación	Doctorado	6	10.53
	Maestría	12	21.05
	Grado	39	68.42
Experiencia de trabajo	< a 10 años	32	56.14
	10 – 20 años	15	26.32
	> a 20 años	10	17.54
Características del proyecto	Público	46	80.70
	Privado	11	19.30

Tabla I.- Antecedentes de los encuestados

De manera general, alrededor del 69% de los contratistas encuestados mencionaron que el promedio de sobretiempos que experimentaron en los proyectos fue entre el 10% y el 30% de la duración original. Así también el 52% de los consultores encuestados mencionaron el mismo porcentaje. Por otro lado el 37% de los consultores mencionaron un sobretiempos del 30% al 50% en comparación con la duración original, el 11% de consultores encuestados señalaron sobretiempos superiores al 50%. Ni los consultores ni los contratistas mencionaron retraso mayor al 100% de la duración original. Estos valores, concuerdan con estudios realizados en países en desarrollo. En Turquía encontraron un retraso promedio del 43,65% en los proyectos contratados con instituciones públicas [3], así mismo en Arabia Saudí, un estudio reveló que 76% de contratistas y 56% de consultores mencionaron un retraso entre 10% y 30% y el 25% de los consultores indicaron un retraso del 30% al 50% [8].

**4.2. Clasificación de causas de retraso.** - Se clasificaron las causas de retrasos para proyectos públicos y privados tal como se muestra en la Tabla I. En proyectos públicos se clasificaron 32 causas en 9 grupos (factores), el primer grupo incluye: proyecto (2 causas), propietario (3 causas), contratista (10 causas), consultor (3 causas), equipo de diseño (3 causas), materiales (1 causa), equipos (2 causas), mano de obra (2 causas), externos (6 causas). En proyectos privados se seleccionaron 22 causas clasificadas en 9 grupos, el primer grupo incluye: proyecto (1 causa), propietario (2 causas), contratista (4 causas), consultor (3 causas), equipo de diseño (2 causas), materiales (2 causas), equipos (2 causas), mano de obra (2 causas), externos (4 causas).

Factor	Causas de retraso en proyectos públicos	Causas de retraso en proyectos privados
Proyecto	1. Disputas legales entre las partes del contrato 2. Tipo de contrato de construcción	1. Tipo de licitación y adjudicación del proyecto
Propietario	3. Retraso en el pago al contratista 4. Retraso en la entrega del terreno al contratista 5. Comunicación y coordinación deficiente	2. Cambio de ordenes al contratista 3. Falta de incentivos al contratista
Contratista	6. Dificultades en la financiación del proyecto 7. Retrabajo por errores durante la construcción 8. Conflicto entre el contratista y otras partes 9. Mala gestión y supervisión de la obra 10. Mala comunicación y coordinación 11. Deficiente planificación y programación del proyecto 12. Métodos de construcción inadecuados 13. Retrasos en los trabajos de los subcontratistas 14. Cambio frecuente de subcontratistas 15. Poca calificación del personal técnico	4. Deficiente planificación y programación del proyecto 5. Métodos de construcción inadecuados 6. Cambio frecuente de subcontratistas 7. Mala comunicación y coordinación
Consultor	16. Retraso en la realización de la inspección y las pruebas 17. Conflictos entre el consultor y el contratista 18. Experiencia insuficiente	8. Retraso en la aprobación de cambios en el alcance 9. Mala comunicación 10. Experiencia insuficiente
Equipo de diseño	19. Errores y discrepancias en los documentos de diseño 20. Detalles poco claros e inadecuados en los planos 21. Experiencia inadecuada	11. Errores y discrepancias en los documentos de diseño 12. Experiencia inadecuada
Materiales	22. Adquisición tardía de materiales	13. Cambios en las especificaciones de materiales 14. Adquisición tardía de materiales
Equipos	23. Averías y escasez de equipos 24. Baja eficiencia de los equipos	15. Averías de equipos 16. Baja eficiencia de los equipos
Mano de obra	25. Mano de obra no calificada 26. Conflictos laborales	17. Escasez de mano de obra 18. Mano de obra no calificada
Externos	27. Retraso en la obtención de permisos del municipio 28. Clima 29. Falta de disponibilidad de servicios públicos en el lugar del proyecto 30. Efecto de factores sociales y culturales 31. Accidentes laborales 32. Cambios en las regulaciones y leyes gubernamentales	19. Obtener permisos de construcción 20. Clima 21. Factores sociales 22. Accidentes laborales

Tabla II.- Causas de retrasos clasificados de acuerdo a factores (grupos)

**4.3. Frecuencia de las causas de retraso.** - Las causas de retrasos más frecuentes según proyectos del sector público y privado, de acuerdo a la percepción de propietarios, contratistas y consultores se muestran en la Tabla III y IV. En proyectos públicos, desde la percepción del propietario, la primera causa más frecuente de retraso es la deficiente planificación y programación del proyecto, en segundo lugar, las dificultades en la financiación del proyecto y en tercer lugar la mala comunicación del contratista, todas las causas relacionadas al grupo de contratistas; desde la percepción del contratista, la primera causa de retrasos son los retrasos en el pago al contratista, en segundo lugar los detalles poco claros e inadecuados en los planos, y en tercer lugar disputas legales entre las partes del contrato; desde la percepción de los consultores, la primera causa es la deficiente planificación y programación del proyecto, en segundo lugar las dificultades en la financiación del proyecto, en tercer lugar el retrabajo por errores durante la construcción.

Causas	General	Propietario	Contratista	Consultor	Factor
Deficiente planificación y programación del proyecto	1	1	9	2	Contratista
Dificultades en la financiación del proyecto	2	2	10	1	Contratista
Retraso en el pago al contratista	3	9	1	8	Propietario
Mano de obra no calificada	4	6	6	7	Mano de obra
Detalles poco claros e inadecuados en los planos	5	10	2	6	Equipo de diseño
Retrabajo por errores durante la construcción	6	4	8	3	Contratista
Mala comunicación y coordinación	7	3	7	5	Contratista
Disputas legales entre las partes del contrato	8	5	3	4	Proyecto
Experiencia insuficiente	9	7	5	10	Consultor
Retraso en la entrega del terreno	10	8	4	9	Propietario

Tabla III. Clasificación de frecuencia en proyectos públicos

En proyectos privados, desde la percepción del propietario, la primera causa más frecuente es la deficiente planificación y programación del proyecto; desde la percepción del contratista, la primera causa son los cambio de ordenes al contratista; desde la percepción de los consultores, la primera causa es la deficiente planificación y programación del proyecto.

Causas	General	Propietario	Contratista	Consultor	Factor
Deficiente planificación y programación del proyecto	1	1	8	1	Contratista
Cambio de ordenes al contratista	2	6	1	2	Propietario
Mala comunicación y coordinación	3	2	9	4	Contratista
Retrabajo por errores durante la construcción	8	4	7	3	Contratista
Errores y discrepancias en los documentos de diseño	5	7	2	6	Equipo de diseño
Métodos de construcción inadecuados	6	3	10	5	Contratista
Adquisición tardía de materiales	7	5	6	7	Materiales
Retraso en la aprobación de cambios en el alcance	8	8	3	9	Consultor
Tipo de licitación y adjudicación del proyecto	9	10	5	10	Proyecto
Retraso en la obtención de permisos de construcción	10	9	4	8	Externo

Tabla IV. Clasificación de frecuencia en proyectos privados

**4.4. Severidad de las causas de retraso.** - Se destacan las percepciones de proyectos públicos y privados, Tablas V y VI. En proyectos públicos, los propietarios señalan como causa principal a las dificultades en la financiación del proyecto. La causa más severa vista por los contratistas son disputas legales entre las partes del contrato; los consultores indican como principal causa a la deficiente planificación y programación del proyecto. En proyectos privados se destaca desde los propietarios como primera causa a métodos de construcción inadecuados; desde el punto de vista de los contratistas a los cambios de órdenes por parte del propietario, y desde el punto de vista del consultor indica como causa principal a la deficiente planificación y programación del proyecto.

Causas	General	Propietario	Contratista	Consultor	Factor
Deficiente planificación y programación del proyecto	1	2	7	1	Contratista
Dificultades en la financiación del proyecto	2	1	9	2	Contratista
Retraso en el pago al contratista	3	10	2	9	Propietario
Mano de obra no calificada	4	7	4	8	Mano de obra
Detalles poco claros e inadecuados en los planos	5	6	3	6	Equipo de diseño
Retrabajo por errores durante la construcción	6	5	8	3	Contratista
Mala comunicación y coordinación	7	4	10	5	Contratista
Disputas legales entre las partes del contrato	8	3	1	4	Proyecto
Experiencia insuficiente	9	8	6	10	Consultor
Retraso en la entrega del terreno	10	9	5	7	Propietario

Tabla V. Clasificación de severidad en proyectos públicos



Causas	General	Propietario	Contratista	Consultor	Factor
Deficiente planificación y programación del proyecto	1	2	7	2	Contratista
Cambio de ordenes al contratista	2	10	1	1	Propietario
Mala comunicación y coordinación	3	4	9	5	Contratista
Retrabajo por errores durante la construcción	8	3	8	4	Contratista
Errores y discrepancias en los documentos de diseño	5	6	5	7	Equipo de diseño
Métodos de construcción inadecuados	6	1	10	3	Contratista
Adquisición tardía de materiales	7	8	6	6	Materiales
Retraso en la aprobación de cambios en el alcance	8	7	2	8	Consultor
Tipo de licitación y adjudicación del proyecto	9	5	3	9	Proyecto
Retraso en la obtención de permisos de construcción	10	9	4	10	Externo

Tabla VI. Clasificación de severidad en proyectos privados

**4.5. Importancia de las causas de retraso.** - El índice de importancia se calculó en base a la clasificación de severidad y frecuencia (Tabla VII y VIII). En proyectos públicos desde la percepción de los propietarios, la primera causa es la deficiente planificación y programación del proyecto, la segunda causa son las dificultades en la financiación del proyecto, la tercera causa es la mala comunicación y coordinación; desde la percepción de los contratistas la primera causa son los retraso en el pago al contratista, la segunda causa son los detalles poco claros e inadecuados en los planos y la tercera causa son disputas legales entre las partes del contrato; desde el punto de vista del consultor la causa principal está relacionado a las dificultades en la financiación del proyecto, la segunda causa es la deficiente planificación y programación del proyecto, y la tercera causa son los retrabajos por errores durante la construcción.

Causas	General	Propietario	Contratista	Consultor	Factor
Deficiente planificación y programación del proyecto	1	1	7	2	Contratista
Dificultades en la financiación del proyecto	2	2	10	1	Contratista
Retraso en el pago al contratista	3	10	1	9	Propietario
Mano de obra no calificada	4	6	5	7	Mano de obra
Detalles poco claros e inadecuados en los planos	5	8	2	6	Equipo de diseño
Retrabajo por errores durante la construcción	6	5	8	3	Contratista
Mala comunicación y coordinación	7	3	9	5	Contratista
Disputas legales entre las partes del contrato	8	4	3	4	Proyecto
Experiencia insuficiente	9	7	6	10	Consultor
Retraso en la entrega del terreno	10	9	4	8	Propietario

Tabla VII. Clasificación de Importancia en proyectos públicos

En proyectos privados, desde la percepción de los propietarios, la primera causa de retrasos es la deficiente planificación y programación del proyecto; desde la percepción de los contratistas la primera causa son los cambios de ordenes por parte del propietario; desde el punto de vista del consultor la causa principal es la deficiente planificación y programación del proyecto.

Causas	General	Propietario	Contratista	Consultor	Factor
Deficiente planificación y programación del proyecto	1	1	8	1	Contratista
Cambio de ordenes al contratista	2	9	1	2	Propietario
Mala comunicación y coordinación	3	3	9	5	Contratista
Retrabajo por errores durante la construcción	8	4	7	3	Contratista
Errores y discrepancias en los documentos de diseño	5	6	3	7	Equipo de diseño
Métodos de construcción inadecuados	6	2	10	4	Contratista
Adquisición tardía de materiales	7	5	6	6	Materiales
Retraso en la aprobación de cambios en el alcance	8	8	2	8	Consultor
Tipo de licitación y adjudicación del proyecto	9	7	4	10	Proyecto
Retraso en la obtención de permisos de construcción	10	10	5	9	Externo

Tabla VIII. Clasificación de importancia en proyectos privados

**4.6. Clasificación de factores (grupos) de retrasos.** - Se categorizo los nueve factores (grupos) mencionados en la Tabla II. La clasificación de los factores en grupos de frecuencia de ocurrencia, grado de severidad e importancia de los propietarios, contratistas y consultores, se presentan en las Tablas IV-XI respectivamente. En proyectos públicos, los propietarios y consultores, especifican como primera causa de retraso al contratista de obra; los contratistas especifican como primera causa al propietario, en segundo lugar indican como causa a los factores relacionados con el equipo de diseño. Del mismo modo en proyectos privados los propietarios y consultores especifican como primera causa al contratista de obra, los contratistas especifican como causa principal al propietario.

Factores de retraso por grupos	Proyectos públicos				Proyectos privados			
	Frecuencia	Severidad	Importancia	Clasf.	Frecuencia	Severidad	Importancia	Clasf
Proyecto	57.18	62.33	35.64	2	46.78	63.08	29.51	6
Propietario	49.74	58.00	28.85	8	54.34	54.34	29.53	5
Contratista	64.00	69.98	44.79	1	63.60	68.73	43.71	1
Consultor	50.79	63.60	32.30	5	51.39	59.35	30.50	4
Equipo de diseño	52.82	64.20	33.91	4	57.42	59.95	34.42	2
Materiales	48.10	62.13	29.88	7	56.70	58.28	33.04	3
Equipos	50.85	61.07	31.05	6	44.45	53.12	23.61	8
Mano de obra	56.01	62.59	35.06	3	45.61	51.45	23.47	9
Externos	48.28	56.37	27.22	9	49.88	55.12	27.49	7

Tabla IV.- Clasificación de factores (grupo) del propietario

Factores de retraso por grupos	Proyectos públicos				Proyectos privados			
	Frecuencia	Severidad	Importancia	Clasf.	Frecuencia	Severidad	Importancia	Clasf
Proyecto	51.53	59.07	30.44	5	46.26	52.77	24.41	7
Propietario	60.11	66.90	40.21	1	58.81	65.60	38.58	1
Contratista	48.01	54.36	26.10	7	46.71	60.06	28.05	6
Consultor	55.79	64.38	35.92	3	57.49	63.08	36.26	2
Equipo de diseño	58.22	64.64	37.63	2	53.92	62.34	33.61	3
Materiales	51.13	58.31	29.81	6	50.23	63.01	31.65	4
Equipos	40.00	50.00	20.00	9	38.70	48.70	18.85	9
Mano de obra	49.79	61.40	30.57	4	48.49	58.10	28.17	5
Externos	42.66	47.99	20.47	8	41.36	46.69	19.31	8

Tabla X.- Clasificación de factores (grupo) del contratista

Factores de retraso por grupos	Proyectos públicos				Proyectos privados			
	Frecuencia	Severidad	Importancia	Clasf.	Frecuencia	Severidad	Importancia	Clasf
Proyecto	50.83	61.20	31.11	5	49.53	59.90	29.67	4
Propietario	52.25	64.57	33.74	2	50.95	66.27	33.76	2
Contratista	56.16	68.11	38.25	1	54.86	63.81	35.01	1
Consultor	41.50	56.59	23.48	6	40.20	55.29	22.23	7
Equipo de diseño	53.87	61.61	33.19	3	46.57	62.31	29.02	5
Materiales	45.69	62.82	28.70	5	44.39	61.52	27.31	6
Equipos	43.44	53.70	23.33	7	42.14	52.40	22.08	8
Mano de obra	49.70	63.49	31.55	4	52.40	62.19	32.59	3
Externos	39.70	49.57	19.68	8	38.40	48.27	18.54	9

Tabla XI.- Clasificación de factores (grupo) del consultor

La clasificación combinada de los factores (grupos) de proyectos públicos y privados, se presenta en las figuras I y II. En proyectos públicos se revela como causa principal de retrasos a factores relacionados con el contratista (deficiente planificación y programación del proyecto, dificultades en la financiación del proyecto, Mala comunicación y coordinación, los retrabajos por errores durante la construcción); en segundo orden a factores relacionados con el equipo de diseño (Detalles poco claros e inadecuados en los planos); y en tercer orden a factores relacionados con el proyecto (disputas legales entre las partes del contrato). Los factores relacionados con los equipos y externos, son de menor importancia.

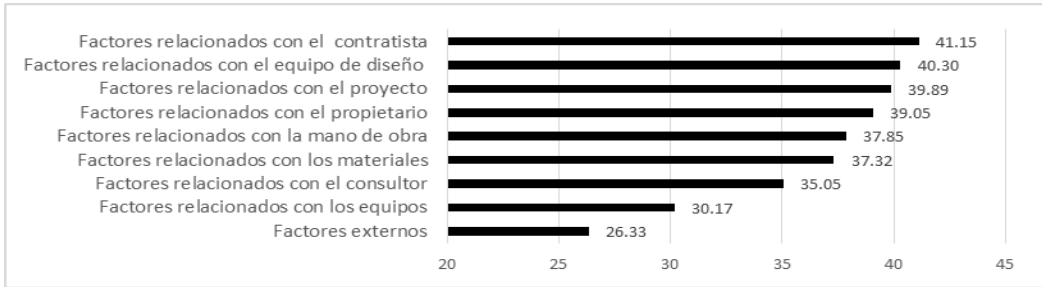


Figura I.- Clasificación de factores - grupos de todas las partes (combinadas) proyectos públicos

En proyectos privados se revela como causa principal de retrasos a factores relacionados con el contratista (deficiente planificación y programación del proyecto, métodos de construcción inadecuados, Mala comunicación y coordinación, retrabajo por errores durante la construcción), en segundo orden a factores relacionados con el propietario (cambios de ordenes por parte del propietario), y en tercer orden a factores relacionados con el equipo de diseño (errores y discrepancias en los documentos de diseño). Los factores relacionados con los equipos y externos, son de menor importancia.

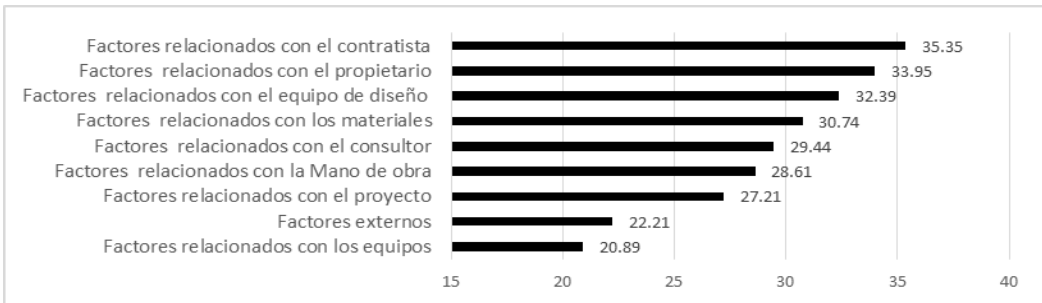


Figura II.- Clasificación de factores - grupos de todas las partes (combinadas) proyectos privados

De las causas de retrasos de construcción examinadas, las causas relacionadas con el contratista tienen el efecto más significativo en los retrasos de manera general, esto es consistente con lo encontrado en países en desarrollo como Ecuador [20] y Egipto [15]. En proyectos públicos los puntos de vista de propietarios y contratistas sobre las causas difieren, ya que tienden a culparse mutuamente por las acciones desfavorables; por ejemplo, los propietarios atribuyen a deficiente planificación y programación del proyecto por parte del contratista como causa, mientras que los contratistas atribuyen al retraso en el pago por parte del propietario. Así mismo en proyectos privados el contratista atribuye al propietario, y los propietarios atribuyen a los contratistas, por tanto existe la tendencia a la culpabilidad de los retrasos. A pesar de algunas perspectivas diferentes en la clasificación, existe un consenso entre las tres partes sobre las causas menos críticas.

**4.7. Correlación de rango de Spearman.-** Los resultados revelan una relación aceptable entre propietarios y consultores con el 76.8%, mientras que la relación más baja fue entre propietarios y contratistas con el 63.4%. Por lo tanto se afirma que los resultados son confiables. Ver Tabla XI.

Partes	Rangos de Spearman coeficiente de correlación	Nivel de significancia
Propietarios y contratistas	0.634	0.95
Propietarios y consultores	0.768	0.95
Contratistas y consultores	0.689	0.95

Tabla XI. Coeficientes de correlacion

**5. Conclusiones.** - El 69% de los contratistas mencionaron que el sobretiempo que experimentaron en proyectos de edificaciones, fue entre el 10% y el 30% de la duración original. Así también el 52% de los consultores mencionaron el mismo porcentaje. Por otro lado el 37% de los consultores mencionaron un sobretiempo del 30% al 50% y el 11% de consultores señalaron sobretiempos superiores al 50% en proyectos de edificaciones.

En proyectos públicos, se encontró desde la perspectiva del propietario como primera causa a la deficiente planificación y programación del proyecto de parte del contratista; desde la percepción del contratista al retraso en el pago al contratista de parte del propietario; desde el punto de vista del consultor la causa principal está relacionado a las dificultades en la financiación del proyecto de parte del contratista. En proyectos privados se encontró, desde la percepción de los propietarios, como primera causa a la deficiente planificación y programación del proyecto del contratista; desde la percepción de los contratistas la primera causa son los cambios de ordenes por parte del propietario; desde el punto de vista del consultor la causa principal está relacionado a la deficiente planificación y programación del proyecto de parte del contratista.

De acuerdo a grupos, en proyectos públicos se tiene a factores relacionados con el contratista como la causa principal de retrasos, seguido por el factor equipo de diseño, y los menos importantes están relacionados con los factores relacionados con los equipos y factores externos. En proyectos privados se tiene como factor principal de retrasos al contratista y en segundo lugar al factor propietario. El estudio revela que tanto en proyectos públicos y privados el factor principal de retrasos está relacionado con los contratistas

**6. Recomendaciones.** - Los retrasos tienen impactos negativos en las partes contractuales. Para mejorar la ejecución de proyectos, es necesario un esfuerzo conjunto de todos los involucrados, para minimizar los impactos. A continuación, se plantea estrategias de respuesta para proyectos públicos y privados, en función a las causas identificadas (Tabla XII y XIII).

Causas de retrasos	Estrategias de respuesta	Responsable
Deficiente planificación y programación del proyecto de parte del contratista	Trasladar la planificación y programación a especialistas con trayectoria en gestión de proyectos y evitar que este trabajo recaiga en profesionales sin experiencia; de esta manera se garantiza un correcto desarrollo de los procesos de planificación y programación y línea de acción para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.	Contratista
Dificultades en la financiación del proyecto de parte del contratista	Evitar que los recursos financieros sean insuficientes en el desarrollo del proyecto, para ello el contratista debe contar con solvencia económica, para lograr la asignación íntegra de los recursos en las diferentes actividades del proyecto.	Contratista
Retrasos en los pagos de parte del propietario	Evitar el retraso en el pago al contratista, porque afecta su capacidad para financiar el trabajo. El propietario debe contar con la suficiente solvencia económica para cubrir los costos, además debe asegurarse de que los fondos estén disponibles antes del inicio de la construcción.	Propietario
Mano de obra no calificada	Transferir la función del manejo de personal de obra a un profesional especializado en recursos humanos, para garantizar la contratación de personal calificado y se cree una cultura de equipo con reglas básicas	Contratista

	claras, para mejorar sus capacidades individuales y grupales.	
Detalles poco claros e inadecuados en los planos del proyecto	Trasladar la elaboración de expedientes técnicos a profesionales de reconocida trayectoria y capacidad, para garantizar la calidad de sus entregables.	Propietario
Retrabajo por errores durante la construcción	Evitar retrabajos por errores, con dicho propósito se debe realizar la supervisión de manera permanente de los trabajos durante la ejecución del proyecto.	Contratista
Mala comunicación y coordinación de parte del contratista	Evitar la mala comunicación y coordinación, para ello se debe establecer una comunicación efectiva, entre las partes del contrato, apoyándose en las tecnologías, el mismo que debe realizarse por canales adecuados, claros y oportunos durante todo el proceso constructivo.	Contratista
Disputas legales entre las partes del contrato	Reducir las reclamaciones de obra en las etapas iniciales de su aparición a fin de evitar las disputas, procesos arbitrales y procesos judiciales, así mismo incluir cláusulas contractuales preventivas en proyectos.	Propietario y contratista
Experiencia insuficiente del consultor	Evitar la selección de un consultor sin la experiencia mínima necesaria, estableciendo inicialmente un requerimiento para su contratación en donde se especifique claramente las habilidades y requisitos que aseguren un correcto desarrollo de la ejecución de la obra.	Propietario
Retraso en la entrega del terreno de parte del propietario	Evitar el inicio de la elaboración del proyecto sin la verificación previa de los documentos necesarios para el planteamiento, tales como el saneamiento físico legal de los terrenos requeridos y la disponibilidad física de los mismos.	Propietario

Tabla XII. Estrategias de respuesta en proyectos públicos

Causas de retraso	Estrategias de respuesta	Responsable
Deficiente planificación y programación del proyecto de parte del contratista	Evitar las deficiencias dentro de la planificación y programación del proyecto, mediante herramientas que permitan la planificación conjunta del proyecto, a través de la programación de las actividades, conjugando los recursos de forma que disminuyan los riesgos.	Contratista
Cambio de ordenes por parte del propietario	Reducir los órdenes de cambio durante el desarrollo de la construcción. El alcance debe estar bien definido, el estudio de factibilidad debe llevarse a cabo cuidadosamente y las estimaciones de costo y cronograma deben ser lo más precisas posible. En caso de órdenes de cambio inevitables, no se debe demorar la revisión y aprobación de los documentos de diseño.	Propietario
Mala comunicación y coordinación de parte del contratista	Reducir las coordinaciones informales entre los stakeholders y procurar establecer relaciones de trabajo de manera formal, a fin de desarrollar una comunicación que permita definir claramente las acciones que beneficie al proyecto y no genere estancamiento en su ejecución.	Contratista
Retrabajo por errores durante la construcción del contratista	Evitar los retrabajos y errores a partir del uso de herramientas eficientes, que puedan advertir tempranamente el riesgo a trabajos rehechos durante la construcción.	Contratista
Errores y discrepancias en los documentos de diseño	Evitar errores y discrepancias de diseño, implementando la metodología VDC, como herramientas que permitan analizar de manera global el proyecto, así mismo se pueda tener una comunicación abierta con el equipo de diseño, lo que permitirá identificar cualquier dificultad durante el diseño.	Equipo de diseño
Métodos de construcción inadecuados del contratista	Evitar métodos inadecuados de construcción, adoptando métodos de construcción eficientes, como el método por flujos que evita el fenómeno de pérdidas de trabajo y maximiza el uso de recursos, consecuentemente maximiza el valor del trabajo en obra.	Contratista
Adquisición tardía de materiales	Evitar la adquisición tardía de los materiales, para dicho propósito se debe gestionar adecuadamente los materiales para garantizar una buena cadena de suministro que permita optimizar los trabajos obra.	Contratista
Retraso en la aprobación de cambios en el alcance	Evitar las modificaciones del alcance de proyecto, de ser el caso procurar realizar cambios, previa reunión con los stakeholders, estableciendo de manera formal, las implicaciones en términos de costo y tiempo.	Consultor
Tipo de licitación y adjudicación del proyecto	Evitar adjudicar los contratos de construcción a la oferta menor, debido a que no garantiza el cumplimiento de los objetivos del proyecto.	propietario

Retraso en la obtención de permisos de construcción	Evitar el inicio del proyecto sin la obtención previa de los documentos necesarios para la ejecución del mismo, es necesario que los permisos se tramiten con anticipación.	propietario
---	---	-------------

*Tabla XIII. Estrategias de respuesta en proyectos privados.*

Estrategias de respuesta generales en proyectos públicos

- Evitar contratos Gobierno – Gobierno (G2G), contratos colaborativos NEC4 – ECC, y contratos FIDIC.
- Reducir Presencia de Dispute Board / Junta de resolución de disputas en los contratos de manera temprana.
- Trasladar el desarrollo de expedientes técnicos a profesionales de reconocida capacidad y calidad de sus entregables.
- Evitar la burocracia y agilizar la toma de decisiones para la implementación de contratos de proyectos de construcción.
- Reducir los riesgos con la implementación de un plan de gestión de riesgos.
- Trasladar la gestión de los recursos humanos a profesionales especialistas
- Adoptar métodos de ejecución conocidos en lugar de adoptar métodos innovadores.

Estrategias de respuesta generales en proyectos privados

- Evitar Contratos colaborativos y contratos Open Book
- Reducir mayor plazo en pre-construcción
- Aceptar el manejo de contingencias por cambios
- Aceptar la formación de un equipo cohesionado y comprometido en el éxito del Proyecto
- Aceptar métodos de ejecución innovadores para mejorar la productividad

## 7. Referencias

- [1] Sambasivan, M. and Soon, Y.W.. *Causes and effects of delays in Malaysian construction industry*. International Journal of Project Management, 2007. 25(5): p. 517–526.
- [2] Koushki, P.A., Al-Rashid, K. and Kartam, N. *Delays and cost increases in the construction of private residential projects in Kuwait*. Construction Management and Economics, 2005. 23(3): p. 285-294.
- [3] Arditi, D., Akan, G. T. and Gurdamar, S. *Reasons for delays in public projects in Turkey*. Construction Management and Economics, 1985. 3(2): p. 171–181.
- [4] Arantes, A., Fernandez da Silva, P., Luis Miguel, D., Ferreira, F. (2015). *Delays in construction projects – causes and impacts*. *Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*. International Conference.
- [5] Alsuliman, J.A. Causes of delay in Saudi public construction projects, *Alexandria Engineering Journal* 58 (2) (2019) 801–808.
- [6] Durdyev, S., Hosseini, M.R. Causes of delays on construction projects: a comprehensive list, *International Journal of Managing Projects in Business* 13 (1) (2019) 20–46.
- [7] Stumpf, G. *Schedule delay analysis*. *Cost Engineering Journal*, 2000. 42(7): p. 32–43.
- [8] Assaf, S. A. and Al-Hejji, S. Causes of delay in large construction projects in Saudi Arabia. *International Journal of Project Management*, 2006. 24(4): p. 349–357.
- [9] Sweis, R. Sweis, A.A. Hammad, A. Shboul, *Delays in construction projects: The case of Jordan*, *Int. J. Project Manage*, 2008. 26 (6): p. 665–674
- [10] Project Management Institute-Perú. *Informe Situacional del Sector Construcción en el Perú Post Covid-2019*, 2021.
- [11] La Cámara. *Revista Digital de la Cámara de Comercio de Lima*, 2022.
- [12] Olawale, Y. A. and Sun, M. *Cost and time control of construction projects: inhibiting factors and mitigating measures in practice*. *Construction Management and Economics*, 2010. 28(5): p. 509–526.
- [13] Mpofu, E., Godfrey, O.C. Moobela, A. *Profiling causative factors leading to construction project delays in the United Arab Emirates*, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2017. 24 (2): p. 346–376.
- [14] Al-Momani A. H. *Construction delay: a quantitative analysis*. *International Journal of Project Management*, 2000.18(1): p. 51–59.
- [15] Alaghbari, M.R.A. Kadir, A. Salim, Ernawati, *The significant factors causing delay of building construction projects in Malaysia*, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2007. p. 14 (2): 192–206
- [16] El-Razek, M.E.A., Bassioni, H.A., Mobarak, A.M. *Causes of delay in large building construction projects*, *Journal of Construction Engineering and Management*, 2008. 134 (11): p. 831–841
- [17] Enshassi, A., Kumaraswamy, M., Jomah, A.N. *Significant factors causing time and cost overruns in construction projects in the Gaza Strip: Contractors' perspective*, *International Journal of Construction Management*, 2010. 10 (1): p. 35–60.
- [18] Doloi, H., Sawhney, A., Iyer, K.C. Rentala, S. *Analysing factors affecting delays in Indian construction projects*, *Int. J. Project Manage*, 2012. 30 (4): p. 479–489
- [19] Akogbe, R.K.T.M., Feng, X., Zhou, J. *Importance and ranking evaluation of delay factors for development construction projects in Benin*, *KSCE J. Civ. Eng*, 2013. 17 (6): p. 1213–1222.
- [20] Pazmiño, E.H. y Calle C.J. *Análisis relativo para identificar las causas de retrasos en las obras de construcción. Caso de estudio Cuenca-Ecuador*, *Ciencia digital*, 2021. Vol. 5, N°2, p. 6-15.

- [21] Gordo, E.M.; Potes, J.A., Vargas, J.L.. *Factores que ocasionan retrasos en obras civiles en Empresas Publicas de Neiva*, Universidad de Santo Tomas – Bucaramanga, 2017.
- [22] Julca, C.A. *Análisis de riesgos de retraso y sobrecoste en obras de suministro de agua potable y saneamiento en Perú*, Máster Universitario en Planificación y Gestión en Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Valencia, 2022.

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

HACC ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MKHQ ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

LVPH ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.



# Utilization of Solar Energy for Cooling Applications: a Review

## *Utilización de la Energía Solar para Aplicaciones de Enfriamiento: una Revisión*

## *Utilização de Energia Solar para Aplicações de Resfriamento: uma Revisão*

Atif Shazad <sup>1</sup>, Muhammad Uzair <sup>2</sup>

Recibido: 08/03/2023

Aceptado: 15/05/2023

**Summary.** - Major portion of energy in the residential sector is consumed to provide the human comfort. The use of conventional energy resources creates the problem of global warming. Due to severe impact of released gases on the environment, there is needed to use the alternative energy resources to maintain the human comfort zone. The use of different solar energy conversion techniques is making a promising contribution to provide the clean energy. The purpose of this study is to provide an overview of recent advancement in the use of solar energy to provide the indoor climate comfort. The use of non-concentrating and concentrating conversion techniques are investigated in detail. The study also discusses about the enticements of solar energy to attract the investment in the merger of solar energy and human comfort industries.

**Keywords:** human comfort; solar energy; heating; cooling; solar thermal; humidification.

**Resumen.** - La mayor parte de la energía en el sector residencial se consume para proporcionar el confort humano. El uso de recursos energéticos convencionales crea el problema del calentamiento global. Debido al severo impacto de los gases liberados en el medio ambiente, es necesario utilizar recursos energéticos alternativos para mantener la zona de confort humano. El uso de diferentes técnicas de conversión de energía solar está haciendo una contribución prometedora para proporcionar energía limpia. El propósito de este estudio es proporcionar una visión general de los avances recientes en el uso de la energía solar para proporcionar el confort climático interior. Se investiga en detalle el uso de técnicas de conversión no concentradoras y concentradoras. El estudio también analiza los incentivos de la energía solar para atraer inversiones en la fusión de las industrias de energía solar y comodidad humana.

**Palabras clave:** comodidad humana; energía solar; calefacción; enfriamiento; solar térmica; humidificación.

---

<sup>1</sup> PhD Scholar, atifshahzad2717@gmail.com, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Pakistan, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3277-7901>

<sup>2</sup> Associate Professor, uzair@neduet.edu.pk, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Pakistan, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2033-6244>

**Resumo.** - Grande parte da energia no setor residencial é consumida para proporcionar o conforto humano. O uso de recursos energéticos convencionais cria o problema do aquecimento global. Devido ao forte impacto dos gases liberados no meio ambiente, existe a necessidade de utilizar os recursos energéticos alternativos para manter a zona de conforto humano. O uso de diferentes técnicas de conversão de energia solar está dando uma contribuição promissora para fornecer energia limpa. O objetivo deste estudo é fornecer uma visão geral do avanço recente no uso da energia solar para proporcionar conforto climático interno. O uso de técnicas de conversão de não concentração e concentração é investigado em detalhes. O estudo também discute os atrativos da energia solar para atrair investimentos na fusão das indústrias de energia solar e conforto humano

**Palavras-chave:** conforto humano; energia solar; aquecimento; resfriamento; solar térmico; umidificar.

**1. Introduction.** - Environment Protection is the ultimate goal to save the world from catastrophic incidents which happened due to change in ambient conditions. Along with environment safety human comfortable is also on prime level to ensure better working in any field. Hence, due increase in demands of energy fluctuates energy prices as well as global temperature limits. Developments through all over the world produce significant changes on environment. Lifestyle of humans has been changed and sumptuous living standards required energy to perform all these actions. Greater energy demands create challenges at environment level to sustain the drawbacks of energy generation. Burning of fossil fuels produces hazardous gases in form of power plant's discharge; the same discharge in gaseous form produces air pollution which is the reason of many health issues. Impact of these gases on global warming is also alarming and need to be reduced due fluctuations in climates of entire globe.

The problem of dangerous globe climate fluctuations required reduction of fossil fuels burning and utilized renewable energy approaches for energy generations like solar, Wind etc. The renewable energy utilization for energy production is the only way to reduce the greenhouse gas emissions and mitigate the effect of climate changing. Figure 1 indicates the harmful effects of fossil fuel power plants on human society. [1] To reduce carbon emissions produced by burning of fossil fuel in Iran, hence several hybrid renewable energy systems have been utilized for electricity generation. The collection and evaluation of data been performed and concluded that hybrid energy configuration provide the intended results like price of electricity is .15\$/KWh and 15.6% investment return. The study indicates three advantages like CO<sub>2</sub> reduction, interest of stake holder and sustainable energy source. [2]

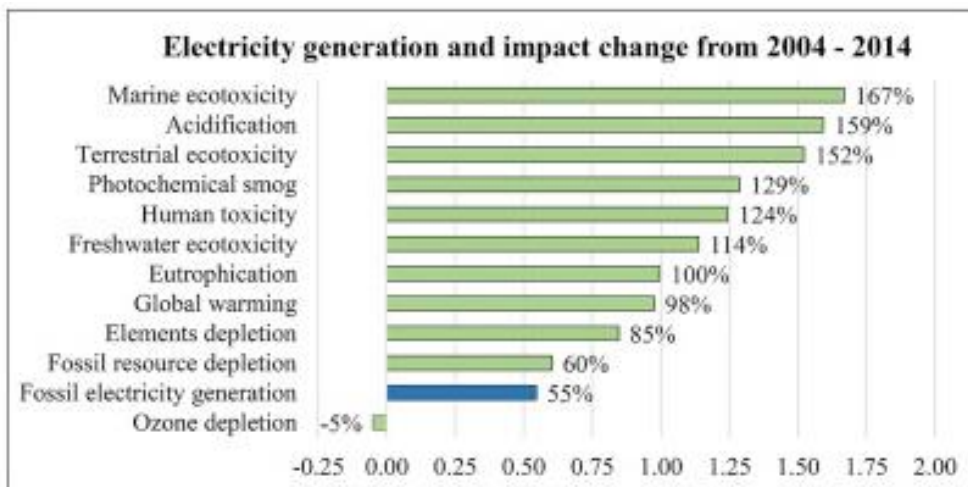


Figure 1.- Fossil fuels impact on Environment [13]

Due myriad negative impacts on environment, increase in fuel prices and shortage of fuel compel governments to introduce new policies for adopting renewable energy for electricity generation. [3,4] Due consistent shortages in fossil fuel supply from reservoirs and due apex in carbon emissions, advanced countries are adopting renewable energy on large scale. [5,6]

**2. Fossil fuels and Energy Shortage.** – Dependency on fossil fuels needs to be reduced due adverse effects on environment, however peoples of policy making, and energy analysis divisions do believe in that utilization of renewable energy is the prime solution to mitigate emissions and generate energy. [7,8] most of carbon emissions relate with power sector but transport sector also

played a vital role in using fossil fuels and producing CO<sub>2</sub> emissions. [9] A research study performed in 2014 on Belgium to consider the shortages and excessive amount of electricity by fossil fuels and nuclear sector. It is concluded that Belgium should replace their current power production technology to renewable in 12 years else their assets would be depleted. [10] South Asian countries are largely depending on coal power generation due abundance amount of coal especially China, India etc. Extraction of coal from mines also produce hazardous impacts on society by releasing toxic gases like Carbon Monoxide (CO) etc and effecting air quality. Hence, such countries are shifting from conventional resources to renewable because they receive 5000trillion kWh insolation on yearly basis. [11,12]

Depletion of fossil fuels is an issue which needs to be addressed, utilization of fossil fuels in energy and transport sector gradually mitigates the reservoirs of fossil fuels. Oil demands increased by 1.3% in 2018 and today share of electricity generated by Oil burning are 40% and transportation sector dependency on oil is around 96%. [13, 14]

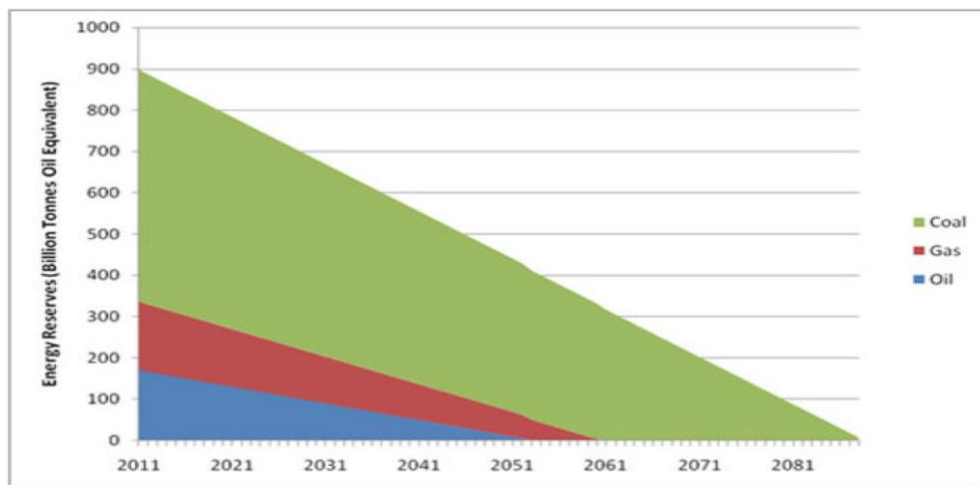


Figure II.- Energy reserves in billion tons of oil equivalent [17]

A huge number of consumptions i.e. 875 billion barrels per annum is used on transportation. Gross utilization of world is estimated about 11 billion tons per annum. Reduction of crude oil reserves is at 4 billion tons per. The current situation indicated that many oil wells reach their dead point and 1000 billion barrels remained. [15] Figure 2 indicates the reduction of fossil fuels relating rate of consumption and production. The mentioned figure indicated the endpoints of fossil fuels reserve and it is alarming for world that endpoints are very close, hence it is required to shift from fossil fuels to renewable sources which are long lasting. [16]

**3. Impacts of Modern Lifestyle on Energy Demand.** – Energy produced in Power plants is utilized for many applications and one of the chief requirements is to cater the cooling load. Due increased population level of the world demands of energy for HVAC system has been increased by enormous amount. Due enhancement in lifestyle the Air conditioning demands is increased, and global warming also played vital role to amplify the cooling loads demands. Vapor compression systems are mostly utilized by residential buildings which impose pressures on national grids as well as causing environmental pollutions due to energy production through fossil fuels. [17]

Residential building sector consumed around 55% of the global energy production and cooling loads comprised 25% energy demands for producing thermal comfort. These Vapor compression systems for producing the intended result of cooling utilizing CFC's and HFC are as refrigerant which create serious environmental issues like Ozone Depletion. Figure 3 represents the increment in HVAC demand. [18]

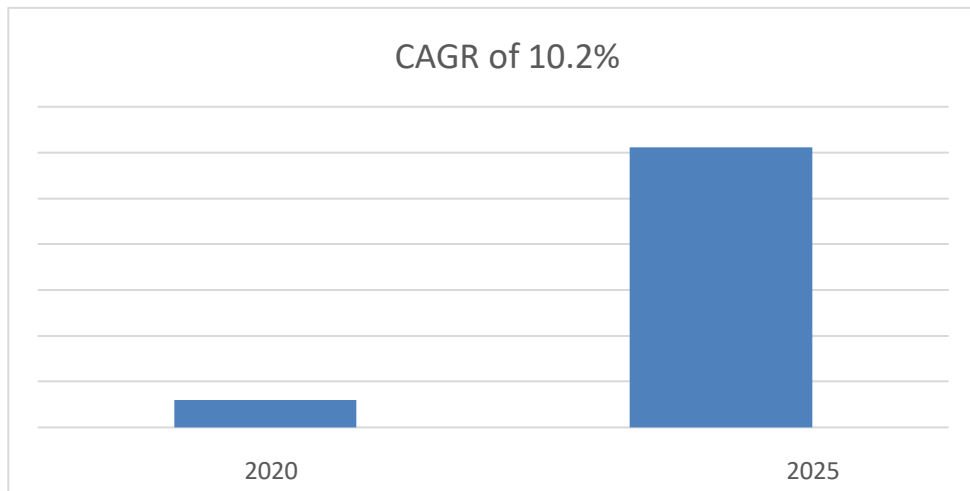


Figure III.- Growth trend of HVAC Demand [19]

Global warming is the intendant results of modern living standards because luxurious transport and houses demands of energy like energy required for cooling of building and refrigeration purposes etc. which comes from burning of fossil fuels. The population of world around 7.59 billion peoples depend on many natural resources. Increased energy demands produce adverse effects like acid rain is one of the most highlighted issue regarding environmental pollution. The sulphur dioxide from coal power plants combines with water content in air and results in acid rain which can acidify lakes and streams, which are chief sources of fresh drinking water in many countries of world. [19] Release of refrigerants i.e., chlorofluorocarbons (CFC's) are very cumbersome for Ozone layer in stratosphere. Due increase in temperature and alterations in lifestyle, human comfort zone is necessary for their health, but it brings many drawbacks like utilization of HVAC systems in buildings produce harmful effects to ozone layer and consumed major portion of electricity in household appliances. The equality maintained by Ozone for earth is due to its Ultraviolet rays' absorption (240-320 nm) and Infrared absorption. Ozone depletion allowed the Ultraviolet rays which enhances the rate of skin cancer, eye damage etc. Figure 4 represents the schematic of Ozone depletion process. [20]

In China, a study has been performed to investigate the effect of CFCs releasing from obsolete residential refrigerators and comparison conducted between other recognized ozone depletion substituents. The results revealed that the per annum increments in residual CFC-11 and CFC-12 has reached to higher value of 4600 and 2300 tons respectively in 2011 and now decreasing to zero until 2020. The amounts of HCFC-141b and HFC-134a are increasing and contribution ratio to ozone depletion will increase from 25% in 2011 to 34% in 2018. Hence, obsolete household refrigerators in china contribute its maximum to ozone depletion. [21]

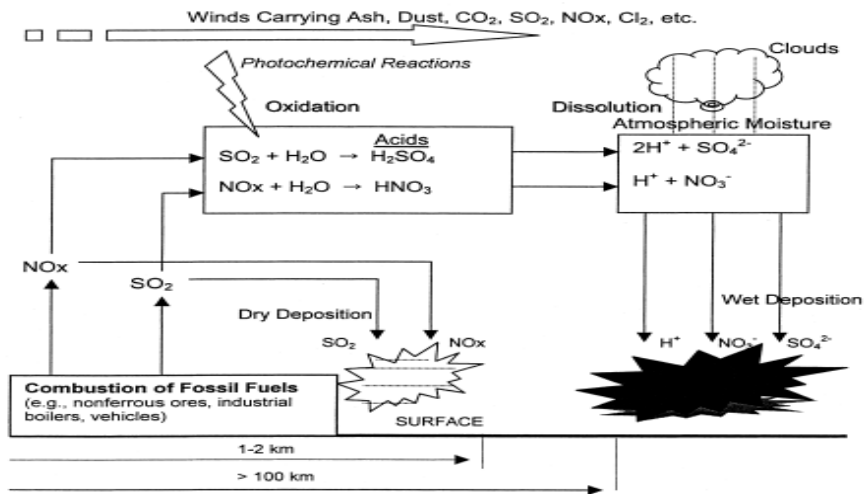


Figure IV.-Schematic of Ozone depletion [20]

The current world challenges are controlling and mitigating the harmful effects of greenhouse gases, the projected intensity of carbon in 2050 is around 0.45 kg of C/yr.W. The intensity is much lower than fossil fuels. To achieve this goal the contribution of fossil fuels in power generation would alter to limited extent. Reduction in dependency of fossil fuel power system can control the steep shortage of fuel. The calculated amount of power required to meet the carbon intensity challenge in 2050 is 10TW from any other source and CO<sub>2</sub> amount will be 550ppm. [23] The major issues of environment are release of CFC's and CO<sub>2</sub> which produce serious impacts on society. Figure 5 represents data of Energy consumption for Indonesia which represents most of the energy are utilized by cooking and cooling equipment's.

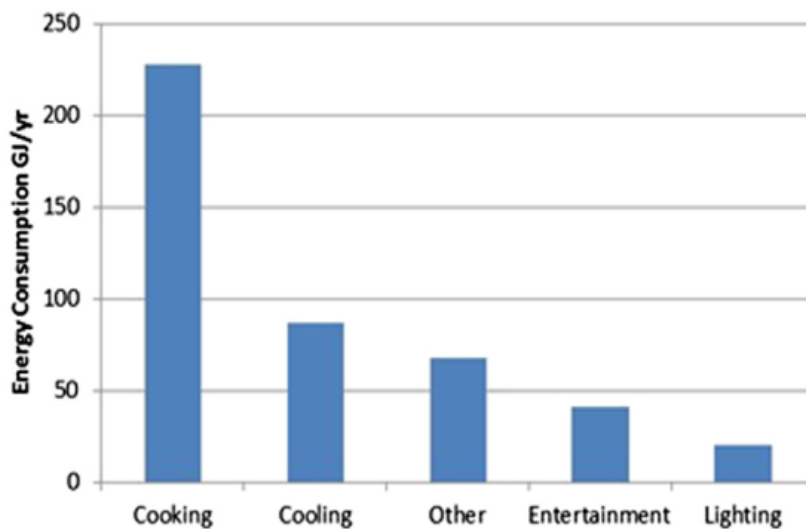


Figure V.-Energy consumption graph in Indonesia for household [22]

Hence, it is very essential to alter the power generation techniques and utilization of renewable energy for power generation purposes. Among the renewable energy Sun is the key part of the system because every renewable source derived from Sun, hence solar energy can change into enormous amount of power. The solar energy is environmentally friendly, and no pollution resulted due utilization of solar energy, the major impact of solar energy on modern lifestyle to change the residential style like consumption of solar energy for cooling purposes. Solar energy played a vital role to control the ozone depletion by controlling the utilization of CFCs due consumption of solar energy for HVAC systems. The energy generated by solar can utilized for household cooling apparatus and solar energy can directly utilized in absorption system for enhancement in Coefficient of Performance (COP). Solar energy can converted into electricity through Photovoltaic (PV) and this energy may utilize for refrigeration system, but due to very low efficiency of PV system, it is not feasible to generate energy by PV.

**4. Utilization of Solar Energy for Energy Generation.** - The world is now shifting from conventional technologies of energy generation to non-conventional systems. Figure 6 delineate the growth of renewable in different technologies and it is clearly didactic in Figure 6 that the growth is very rapid to maintain the stability in climate level.

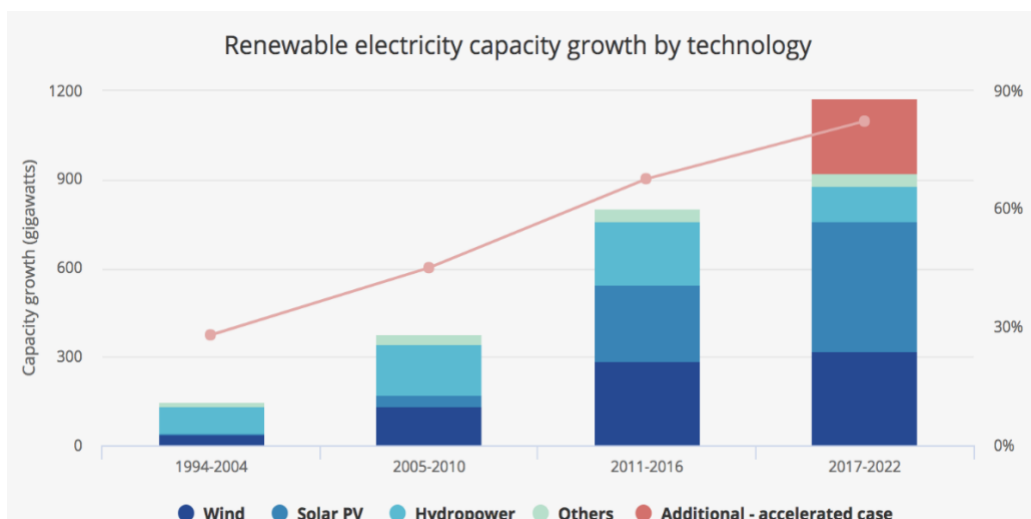


Figure VI.-Share of Electricity by Renewable [24]

Solar power among renewable energies is very mature now and most of the world achieving handsome irradiance factor. Hence, consumption of Solar energy is greater than all other renewable sources due its maturity. In 2019, United States solar power production culminate to 70 TW from Solar thermal and Photovoltaic, in comparison with 2011 when it just below 2 TW. The leading solar power utilities of United States are in California, Florida, Texas, and North Carolina. Figure 7 described the increment of solar power generation in USA.[25]

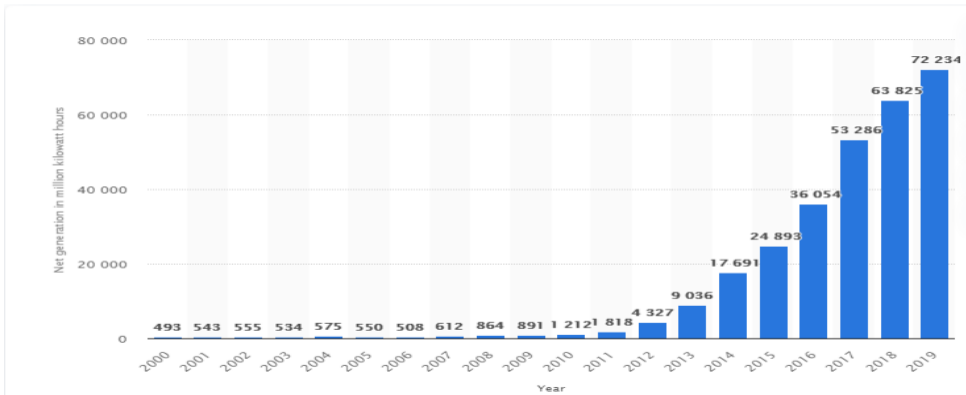


Figure VII.-Solar Power Generation in USA [25]

**5. Solar Energy for Refrigeration applications.** - The demand of air conditioning is increasing, and this requirement is achieved by using vapor compression systems. The utilization of vapor compression system is very expensive due high demand of electricity; hence it imposes pressure on national grids. The HVAC load comprised of sensible and latent load. A good air conditioning system should cumulatively deal with both loads. The drawback of vapor compression system is relevant to environmental pollution due green-house gases emissions. Ozone depletion in upper atmosphere is the main cause of using CFCs in conventional system. However, the demand of using such systems is increasing at a rate of 6.2% up to 2014. [26]

Solar thermal collectors instead solar PV panels are utilized for heating and cooling purposes with central air conditioning system mostly. Solar thermal collectors also used for electricity generation but require large area for installation. The main focus of this study is to delineate the HVAC utilizations of most common solar thermal collectors which are categorized in Figure 8. These below mentioned collectors are easily available in local market. These thermal collectors provide the temperature output within range of 60 to 240°C, non- concentrating thermal collectors are suitable for low temperature applications and concentrating thermal collectors are feasible for high temperature requirements. The two types of concentrating thermal collectors are discussed in detail due high utilization and easy availability in market.

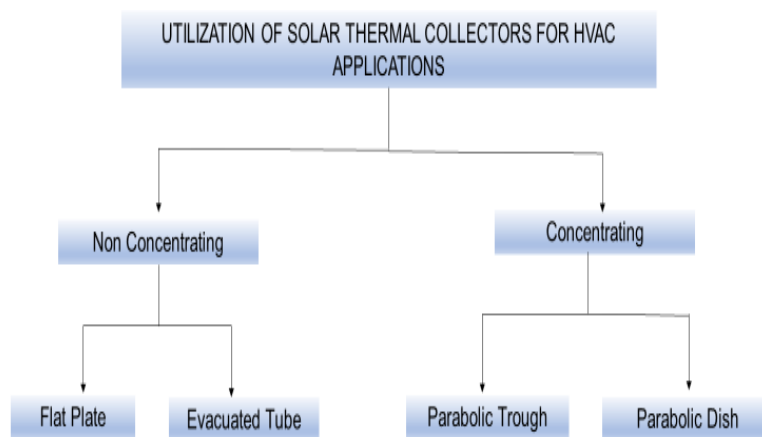


Figure VIII.-Solar energy utilization for HVAC by thermal Collectors.



**5.1 Non-Concentrating Solar Thermal Collectors.** - The solar thermal collector in which areas of solar energy collection and absorbing are same, hence absorbed solar energy is converted to heat and utilize for useful purposes.

**5.1.1 Flat Plate Collector.** - Direct conversion of solar energy into electricity is done by using PV panels and this energy can be used for conventional air conditioning and refrigeration system like vapor compression etc. However, PV panels provide poor efficiency about 15-20 % maximum. Furthermore, due intermittent nature of solar energy, storage system must be necessary. Electricity storage after generation by PV panels is much expensive than thermal storage. Hence, an alternative approach is necessary to utilize solar energy at higher efficiencies with reduced storage problems. Therefore, solar thermal collectors are utilized for harnessing solar thermal energy and its utilization into heat driven cooling technologies. The solar thermal collectors provide better efficiency upto 80% in comparison with PV panels.

Flat plate collector is solar thermal energy collection equipment utilized for space heating and cooling operations with absorption chillers, water heating and various different applications. Flat plate collectors are appropriate for low temperature purposes. Solar energy is abundant in nature and availability marked free, hence Flat plate collector capture the free solar energy and heat the water temperature up to 80°C. The water at this temperature can be utilized for space heating and for bath applications. It can be used with absorption chillers for cooling applications. [27] Space heating and cooling focusing on setup efficiency which further dependent on system components performance. The single stage 4.5 kW LiBr–H<sub>2</sub>O absorption chiller with Flat plate collector of 12m<sup>2</sup> area was tested as a prototype. The average coefficient of thermal performance (COP) is improved almost 100%. The experimental results have revealed that the utilization of renewable energy with cold storage devices are feasible with better COP. [28]

A study conducted on solar absorption system to categorize them as single stage, double stage and multi-stage. Hence, FPC will be utilized easily with single stage due generator temperature of around 80°C with COP of 0.7. The COP of double stage rose from 0.7 to 1.4 along with increased temperature requirements in range of 100 to 150°C. Ultimately, the peak value in COP of solar absorption system approached to 1.8 with multi-stage effect driven with temperature source of 180–240°C. [29] Finally, it was concluded that with the low temperature requirements it is feasible to utilize FPC and ETC except with multi-stage solar system, concentrating collectors are very suitable to fulfill temperature requirements. [30] Solar collectors may be utilized with absorption and adsorption cooling system, adsorption system has lower value of COP with temperature requirements between 45-65°C instead of absorption system with temperature requirements ranges between 80 to 240°C. [31]

A study shown the performance of single effect 17 kW LiBr–H<sub>2</sub>O absorption cooling system. The system required energy is 30kW which received by boiler. The maximum (COP) of this system by utilizing Flat plate collector achieved around 70°C. a numerical study also performed to stimulate the practical states and declared a good match between numerical and experimental data. [32,33] An integrated Solar system of Heating and Cooling had been studied and results represents that with two Stage absorption cooler system of 100kW capacity, maximum COP achieved around 60 to 75°C. The COP achieve was 0.44 which is higher than previous COP 0.38. [34] An another study performed in Jordan in the month of May that COP value of actual system was improved to 0.55 due utilization of 1.5 ton solar cooling system. The system contained Flat Plate Collector of 14 m<sup>2</sup> and around five heat exchangers. [35]

**5.1.1 Evacuated Tube Collector.** - The temperature produced by FPC is around 70°C which is easily utilized for space heating and cooling system. The high temperature conventional system of heating should be replaced by an alternative source which can generate temperature more than 100°C for some requirements. The cooling technologies like absorption chiller system required heat energy which is provided by Flat Plate Collector and Evacuated Tube Collector. [36-40]

A study has been conducted on Solar heating and cooling system to investigate single stage LiBr–H<sub>2</sub>O absorption chillers. Solar thermal source utilized are Evacuated tube and Concentrating Photovoltaic solar collectors. Energy savings achieved by Evacuated tube collectors are 74% and concentrating photovoltaic collectors often reach to 100%. [41] As proceeding with solar refrigeration system, the main obstacle between these efficient system and market is the high manufacturing cost of system. However, various techniques like single bed solar system of absorption cooling method in hot temperatures were performed, and it is concluded that optimum performance point obtained at 30 l/min flow rate. Other factors like Coefficient of performance, specific cooling power and evaporator temperature were 0.55, 39 W/kg and 6.6°C. [42]

The recent advancement in adsorption cooling technologies is to couple solar thermal collector and cooling system in one single unit module. A practical system in which a simple adsorption system resides inside of evacuated glass tube collector with dimensions of length approx. 180 cm and internal diameter is around 5.5 cm. The investigations performed experimentally to optimize the adsorbent bed design and results shown that system is very cost effective and energy saving. Zeolite 13X declared best due better rate of adsorption and Solar COP of module was marked as 0.15. [43]

A research study conducted to investigate minimum collector area for one ton of refrigeration in capital of Labnan, the desired output was obtained by modelling and simulation of absorption system associated with solar energy. The findings declared minimum area required for collector per ton refrigeration is 23.3 m<sup>2</sup> along with optimal storage of water around 1500L for 7h each day. [44]

In Malaysia, a study has been performed to investigate the optimum collector area for and slope angle along with water storage system. The evacuated tube collector and LiBr-H<sub>2</sub>O absorption cooling system are coupled, simulation was performed on TRNSYS program. Hence to achieve continuous operation 0.8 m<sup>3</sup> warm water tank is necessary. Results delineate that 3.5 kW cooling system comprised of 35 m<sup>2</sup> evacuated tubes and solar collector slope was 20 degrees. Figure 9 described the schematic diagram of absorption cooling system assisted with solar thermal collectors. [45]

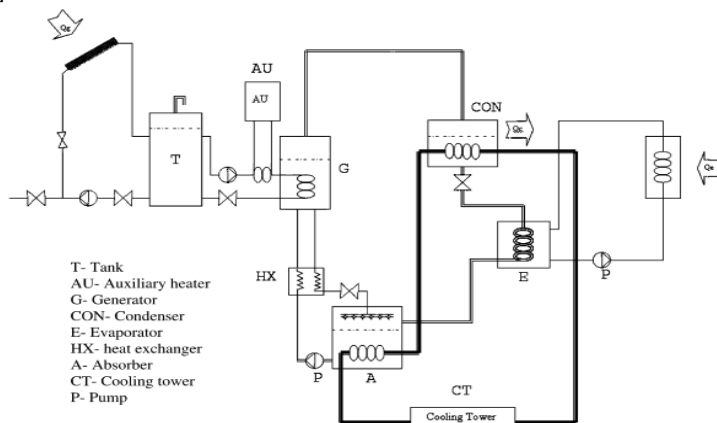


Figure IX.-Schematic of solar absorption cooling system [45].

**5.1 Concentrating Solar Thermal Collectors.** - The concentrating Solar thermal collectors utilize the reflection technique to concentrate the reflected solar rays on receiver where the solar energy converted into heat. This heat energy may utilize for space heating and cooling purposes etc. However, due to high temperature production, these thermal collectors can be used for power generation.

**5.2.1 Parabolic Trough Collector.** - The parabolic thermal collector comprised of parabolic reflector, absorber tube which contained working fluid and transparent cover. [46] Sun tracking may utilize for better performance of system. Parabolic collectors consider as an effective collector for double stage chillers because of its high temperature generation up to 400°C. [47]

The realistic conditions can best delineate the performance of PTC coupled with absorption chillers, the experimental findings considered as reliable source. A study performed in 2005 ensured that using PTC with absorption system provide a comprehensive solar assisted cooling system. Concerning the above, solar assisted double effect absorption cooling system was analyzed and concluded that COP of chiller unit was improved to the value of 1.5. [48] Another experimental study conducted on PTC with 50 m<sup>2</sup> area integrated with 16 kW double effect system in 2010. The results indicated that the design optimization make it possible to achieve 39% cooling load [49].

The concentrating collector can provide same COP by capturing less irradiation in comparison with non-concentrating collectors which can absorb more irradiation. In this regard, a comparative study conducted on double effect absorption system integrated with PTC and FPC. It is concluded that cooling unit exhibited same performance for FPC and PTC, COP value ranges between 1.1 to 1.3. The FPC received 11 % more fractions as compared to PTC. [50]

The relation of temperature of water with COP of chiller is in direct proportion. A number of studies have been performed to evaluate the fact. A research study on PTC coupled single stage (LiBr-H<sub>2</sub>O) absorption system concluded the COP of system ranges between 0.11 to 0.27 when temperature was around 90°C. Hence, low water temperature is directly producing its impact in form of low COP. [51] A research study conducted on double stage (LiBr-H<sub>2</sub>O) absorption system integrated with PTC, author concluded the COP within range of 1.04 to 1.29 when temperature of working fluid was 216°C [52].

A comparative study between solar thermal collectors likes FPC, ETC and PTC had performed. The conclusion of comparison figured out that the PTC integrated with double effect absorption system provided better and efficient results. The study delineated briefly about overall efficiency of system and investment cost due utilization of thermal collectors.[53] The integrated solar cooling system ability to utilize PTC other than FPC and ETC provide better results in case of double effect absorption system. The solar energy absorbing fraction was proved highest on annual basis in PTC as compared to compound parabolic trough and FPC/ETC. [54]

The mentioned absorption cooling technique utilizing heat for separation of refrigerant from refrigerant/absorbent mixture. So many refrigerant/absorbents are under study for achieving better performance vide absorption cooling technique, however LiBr/H<sub>2</sub>O is the most efficient solution for absorption cycle. [55] Furthermore, the absorption cooling system categorized as single effect and double effect, comparison performed between single and double effect system. Results indicated the increase of COP of double effect system and study declared that double effect system was providing 60- 70 % greater COP than single effect system. [56] The single effect require low temperature like 80- 90°C and temperature requirement of double effect is around 150-200°C.

The performance level of solar thermal collector hence depends on heat energy provided to system for splitting of refrigerant, hence performance of FPC and ETC are remarkable different than PTC due variation on temperature levels. [57]

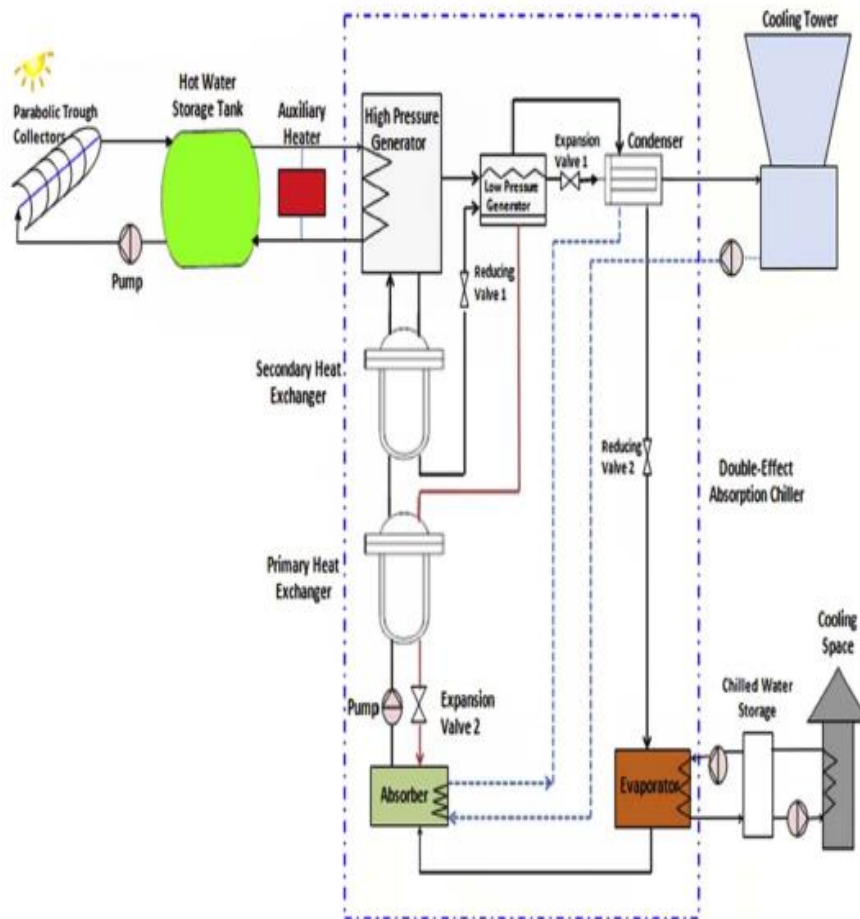


Figure X.-Double effect PTC integrated absorption cooling system schematic diagram [58].

The potential of utilizing PTC with double effect absorption system regarding cooling in buildings of residential area in UAE was studied; the model considered in Figure 11 was appropriate which provide continuous cooling at night in absence of sun. Hence, biomass energy utilized for cooling after sun set down. The building with cooling load 366kW was selected, the results concluded after research study delineated that hybrid system with 30% solar share is best suited with annual energy savings of 519322 kWh and annual operating costs were reduced by 65%. The schematic diagram of project is represented in Figure 10. The project payback period restricted to 2.5 years and environmental impact regarding reduction in carbon emissions is 304 tons/yr. [58] Another research study conducted on LiBr-H<sub>2</sub>O absorption system which investigate solar system of moderate Temperature, hence a double effect absorption chilling system with 50m<sup>2</sup> surface area of PTC. The achieved temperature was around 200°C and study showed results around higher COP

value of 1.2. [59]

Most studies revealed the performance of LiBr-H<sub>2</sub>O as working fluids; however there are other fluids available which may be utilized for solar absorption system like a study performed on solar-geothermal cooling system in which LiBr-H<sub>2</sub>O was replaced by sodium hydroxide-water. The results showed the improved COP of 0.71 was achieved. Similar study on NH<sub>3</sub>-LiNO<sub>3</sub> as a working fluid was executed without geothermal energy source; the maximum COP attained was 0.56. Hence, there are other working fluids which may consider as an alternative approach, but LiBr-H<sub>2</sub>O is very common and easily available. [60,61]

**5.2.2 Parabolic Dish Collector.** - Parabolic dish collector is another type of concentrating collector which focus the beam of light on a focal point where receiver is installed. The parabolic dish collector produces heat at various temperatures. Dual axis tracking is utilized to follow Sun and dish collectors concentrate the beam of radiation on receiver at focal point. Some systems are coupled with heat engines like Stirling engine to generate electricity. The Dish collector system can raise temperature up to 1000°C and achieve maximum efficiency in conversion system of solar energy to electricity. [62]

Many studies have been performed to evaluate the performance of Dish collector, hence a study conducted on behavior of Dish collector under wind induced vibration. The effects on frequency and amplitude due to several parameters like Pitch angle, velocity of wind etc. are investigated. Another study conducted to investigate the effects of height angle and wind angle on drag and lift coefficient of dish collector. [63, 64] The utilization of dish collector for refrigeration applications are reviewed to compare the best solar thermal collector for solar refrigeration applications.

The dish collector is renowned for high temperature applications like electricity generation etc. The utilization of dish collector for refrigeration applications is made possible through various research studies like a study conducted on design and performance of a refrigeration system coupled with solar dish collector. The achieved COP of the system was 0.172 and lowest temperature achieved was 9°C. [65] The alternate of compressor in refrigeration system was very necessary due very high energy demands and environmental impacts. A research conducted in Poland on hybrid system utilizing both Flat plate collector and Dish collector for absorption system of refrigeration. The model was analyzed via TRNSYS software to evaluate the performance by simulation as well as practically. The conclusions comprised of dish collector efficiency were 70%, savings in energy consumption around 50% and simple back period in range of 8.23 years. [66]

The combination of different technologies in one unit to generate the feasible consequences, similar study had performed in Tehran on integration of Dish collector with double effect refrigeration system, Solid oxide fuel Cell (SOFC) and Organic Rankine Cycle for applications like space heating and cooling and electricity generations. The results showed that efficiencies of system were calculated as electrical efficiency of SOFC, electrical efficiency of combine system and overall thermal efficiency. The values of efficiencies are 41.5%, 48.7%, 79.5% respectively. The payback period calculated was 4.43 years. [67]

The experimental study was performed on coupled system of solar and biogas energy for power generation and cooling, heating applications. The combined system utilizes solar energy by dish collector to drive a reactor of biogas energy. The utilization of fossil fuel over year was around 57% and carbon emissions were reduced to 8.20%. [68]

The combined system coupled with solar energy is prone to higher fossil fuel consumption as compared to hybrid solar system for absorption system which comprised of FPC and PDC

(Parabolic Dish Collector). The energy savings was reached to 50% for a home of residential purpose by utilizing hybrid solar system. [69] So many research studies were conducted on performance of PDC integrated absorption system and impacts of climate on PDC coupled refrigeration system. Hence, results indicated that ambient temperature has strong influence on cooling performance of PDC driven refrigeration system. The obtained COP was around 1.6. [70]

The performance indicator of PDC is ambient temperature as suggested in above mentioned study; however, another study performed to evaluate the effect of mean temperature of cooling fluid in cooling and heating arrangement. The COP of refrigeration system coupled with PDC is dependent on mean temperature of fluid and ambient temperature also. The results showed that the PDC was providing warm water in winter for heating purposes and cooling supply in summer at HEnergia center. Figure 11 showed the solar refrigeration system which comprised of PDC at HEnergia for domestic purposes. [71]



Figure XI.-PDC installed at HEnergia center for cooling [71].

**5.2.3 Cost Comparison of Solar Thermal collectors.** - The economic comparison between solar thermal collectors is very essential to evaluate the payback period because payback period is the only reason to induce people regarding interest of money investment and time investment. The comparative analysis was performed between FPC, ETC and PTC. The ETC and FPC were coupled with single effect absorption chiller; however PTC was coupled with double effect absorption system. The PTC integrated refrigeration system payback period was 2.49 year and payback period of FPC and ETC was calculated about 4.75 years. Figure 12 depicted the complete cost analysis between FPC, ETC and PTC. Figure 13 and Figure 14 represented the Payback period comparison and CO<sub>2</sub> emissions comparison between FPC, ETC and PTC. [72] Another comparison was accomplished in Riyadh, the comparison made between double effect PTC integrated refrigeration

system and single effect ETC driven refrigeration system. The results concluded finally to utilize PTC integrated system although the cost of this was 17% higher than ETC coupled refrigeration system, but due improved thermal performance, PTC integrated system was decided to utilize. [73]

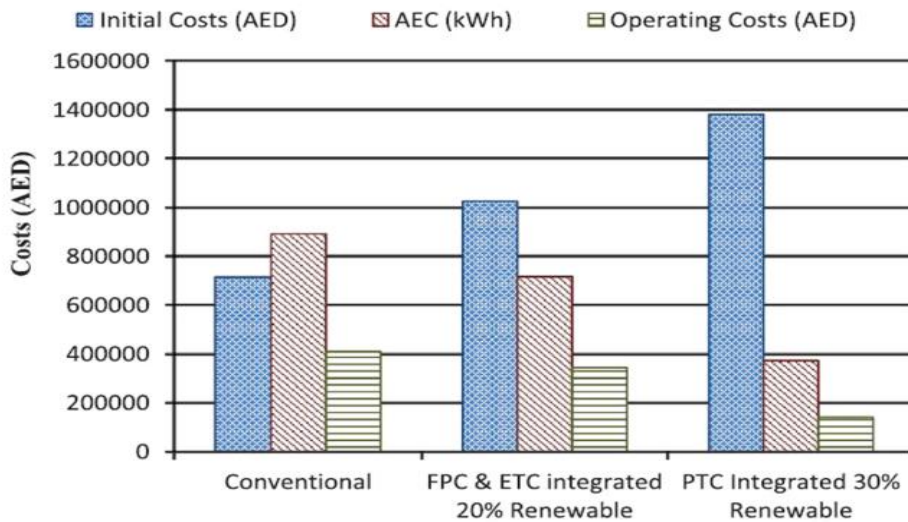


Figure XII.-Complete Cost analysis of Solar Integrated Absorption system with FPC, ETC and PTC [72].

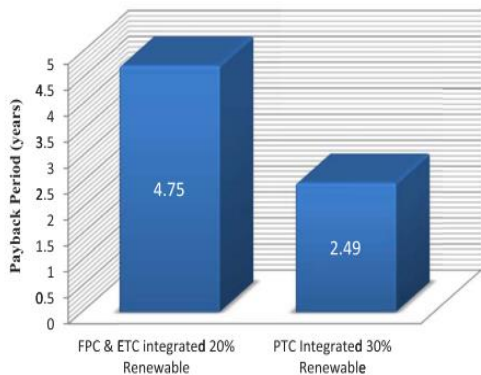


Figure XIII.-Comparison of Payback period [72].

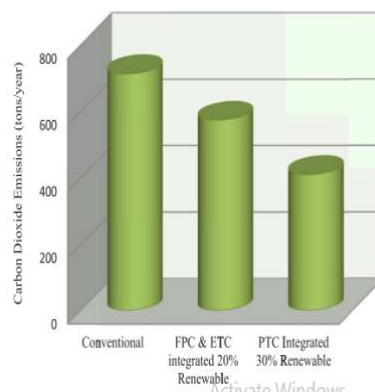


Figure XIV.- Comparison of CO<sub>2</sub> emissions

Moreover, some recent studies after 2021 about solar aided cooling and heating technology are discussed to show trend and recent advancements. Similarly, results of a solar adsorption cooling system using silica gel and water show that as the cooling load increased from 10 to 100 TR, the area of the condenser, evaporator, bed, and collector increased, and the mass flow rate of the collector, condenser cooling water, chilled water, and the cooling circuit increased by 9 times. The system's cost and mass of silica gel also increased with higher cooling loads, reaching \$189,169.6 and 22,667 kg for 100 TR [74]. Study conducted to simulate a solar adsorption refrigeration system

in a cold store under different climatic conditions. The system's performance characteristics were evaluated monthly, and an economic analysis was applied using the weighted cost cooling method. The results indicated that the system could be operated efficiently with a low heat source in hot and dry climates. Furthermore, the levelized cooling cost was lower in hot and dry climates compared to humid climates [75]. Various configurations, including a separable ABC-ADC system, a combined ABD-ADC in parallel operating mode, a standard single-stage ADC cycle, and other integrated systems, were compared to the suggested system. The combined ABD-ADC configuration demonstrated higher cooling capacity and COP than other systems, including a 58.34% and 27.07% increase over the single-stage ADC system's capacity and COP, respectively, at 85°C heat source temperature [76].

The study analyzes a cooling process that uses an ammonia-water working fluid and a hybrid source (natural gas-solar) to determine the variables that affect its thermal performance. The study used experimental data from a 10.5 kW cooling capacity system and evaluated three AI techniques for modeling the thermodynamic cycle. The results show that the inlet temperature at the generator and the heat measured at the evaporator have the greatest impact on the system's performance [77,78]. Hence, absorption systems are an appealing option for cooling systems as they use less energy than VCRS systems and can work with refrigerants that emit fewer pollutants into the atmosphere. By incorporating renewable energy technologies, such as solar or geothermal power, absorption systems can also partially meet their energy demands while reducing their carbon footprint. Thus, absorption systems have the potential to significantly contribute to the decarbonization of refrigeration systems [79].

Several research shown combination of photovoltaics and cooling systems. In this regard, study about integration of an organic Rankine cycle-vapor compression refrigeration system with a photovoltaic thermal compound parabolic collector to simultaneously produce electrical power and cooling was performed. The system's performance was evaluated based on energy, exergy, and environmental criteria, considering parameters such as expander inlet temperature, packing factor, and number of collectors. The results show that the system's energy and exergy performance are best at an expander inlet temperature of 423 K and packing factor of 0.25, while its environmental performance is maximum at an expander inlet temperature of 373 K and packing factor of 0.89. Increasing the number of collectors improves the system's exergy and environmental performance [80].

This study focuses on the use of photovoltaic thermal (PVT) systems to meet electricity requirements, which can be negatively impacted by high ambient temperatures. By integrating an air duct to cool the PV module, the PVT system demonstrated improved electrical efficiency compared to a simple PV panel with no cooling effects. The thermal efficiency of the PVT system was also determined and a correlation between ambient and outlet air temperatures was developed. These findings can benefit areas where both electricity and space heating are needed [81]. Performance evaluation of PVT system is very essential because its efficiency is not much higher to meet up energy demands as compared to other energy generation units [82]. Hence, study conducted in Karachi, Pakistan focuses on the impact of dust accumulation on the performance of photovoltaic (PV) modules. The experiment, conducted over a year, found that dust deposition on PV modules caused a reduction of 14.6 W/month in power, 0.3%/month in efficiency, and 1.84% in performance ratio. The results indicate that dust accumulation can significantly reduce the performance of PV modules [83].



**6. Conclusion.** - The solar energy is having the ability to provide the power as well as it can be directly used in the air-conditioning and refrigeration applications without having any impact on the global warming. Therefore, it is very essential to utilize this clean energy in different applications to provide a change in the energy mix, stability and sustainability of the energy and ultimately to increase the system performance. Having minimal environmental issues, the solar energy can be used to provide indoor human comfort. Use of PV systems or the thermal systems have their own pros and cons; however, the thermal systems provide a shorter payback period compared with PV system and also capable to provide improved system performance. This study also suggested the solar integrated refrigeration system which is comparatively providing higher output values. The study provides a recommendation that different solar energy conversion techniques, with their pros and cons, can be utilized to improve the energy mix of any country.

**7. Data Availability.** – No data is generated during this study.

## 8. References

- [1] Shawn K. Olson-hazboun. Why are we being punished, and they are being rewarded. views on renewable energy in fossil fuels-based communities of the U.S. west. The Extractive Industries and Society. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.05.001>
- [2] A.Razmjoo, L.Gakenia Kaigutha, M.A.Vaziri Rad, M.Marzband, M.Denai . A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO2 emissions in a high potential area. Renewable Energy. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.042>
- [3] E. Muh, F. Tabet, Comparative analysis of hybrid renewable energy systems for off-grid applications in southern Camerouns, Renew. Energy 135 (2019) 41e54.
- [4] S.E. Hosseini, A.M. Andwari, M.A. Wahid, G. Bagheri, A review on green energy potentials in Iran, Renew. Sustain. Energy Rev. 27 (2013) 533e545.
- [5] O. Ellabban, H. Abu-Rub, F. Blaabjerg, Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology, Renew. Sustain. Energy Rev. 39 (2014) 748e764.
- [6] H. Karunathilake, P. Perera, R. Ruparathna, K. Hewage, R. Sadiq, Renewable energy integration into community energy systems: a case study of new urban residential development, J. Clean. Prod. 173 (2018) 292e307(sustainable urban transformations towards smarter, healthier cities: theories, agendas and pathways)
- [7] A. Razmjoo, R. Shirmohammadi, A. Davarpanah, F. Pourfayaz, A. Aslani, Standalone hybrid energy systems for remote area power generation, Energy Rep. 5 (2019) 231e241.
- [8] A.A. Razmjoo, A. Sumper, A. Davarpanah, Energy sustainability analysis based on SDGs for developing countries, Energy Sources, Part A Recovery, Util. Environ. Eff. 42 (9) (2020) 1041e1056.
- [9] J. Koornneef, A. Ramírez, W. Turkenburg, A. Faaij, The environmental impact and risk assessment of co2 capture, transport and storage- an evaluation of the knowledge base, Prog. Energy Combust. Sci. 38 (1) (2012) 62e86
- [10] Ruben Laleman, Johan Albrecht. Nuclear and old fossil phase out scenarios: Assessment of shortages, surpluses and the load factor of flexible assets with high renewable generation targets – A Belgian case study. International Journal of Electrical Power & Energy Systems.
- [11] UN Environment Program Report. Global trends in Renewable Energy Investment 2015. ([http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/attachments/key\\_findings.pdf](http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/attachments/key_findings.pdf)) [accessed 20.07.15 07.2015].
- [12] World Energy consumption Monitoring of world populated countries. US debt Clock.org. (<http://www.usdebtclock.org/energy.html>) [accessed 20.07.15]
- [13] Carlos Gaete-Morales, Alejandro Gallego-Schmid, Laurence Stamford, Adisa Azapagic. Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Chile over a ten-year period. Journal of Cleaner Production ( IF 7.246 ) doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.374
- [14] Gioietta Kuo . When Fossil Fuels Run Out, What Then. Collapse economy and Energy environment. <https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run/>.
- [15] The Future of Oil. Institute for the Analysis of Global Security. Journal of Energy security. <http://www.iags.org/futureofoil.html>
- [16] Jackson Howarth. When Will The Earth Actually Run Out Of Fossil Fuel? Octopus Energy. <https://octopus.energy/blog/when-will-fossil-fuels-runout>
- [17] Luis Pe´rez-Lombard , Jose´ Ortiz , Christine Pout “ A review on buildings energy

- consumption information” US department of Energy. Journal Energy and Buildings <https://dx.doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2007.03.007>.
- [18] Intentional Energy Agency (IEA), The Future of Cooling. 2018
- [19] Stratview Research, strategic Insight delivered, HVAC Insulation Market Size to experience an impressive growth of 10.2%. <https://www.stratviewresearch.com/776/hvac-insulation-market.html>.
- [20] Ibrahim Dincer. Renewable energy and sustainable development: a crucial review, Renewable and sustainable energy Reviews. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00011-8).
- [21] Xiangyang Zhao Huabo Duan, inhui Li. An evaluation on the environmental consequences of residual CFCs from obsolete household refrigerators in China. Waste management. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.018>.
- [22] Iwan Sukarno, Hiroshi Matsumoto, Lusi Susanti. Household lifestyle effect on residential electrical energy consumption in Indonesia: On-site measurement methods. Urban climate, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.008>.
- [23] Nathan S. Lewis and Daniel G. Nocera Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. <https://doi.org/10.1073/pnas.0603395103>.
- [24] Steve Hanley, 7 Charts — Solar Leads the Way as Renewables Grow Faster than Expected. Clean technica. <https://cleantechnica.com/2017/10/05/solar-leads-way-renewables-grow-faster-expected>.
- [25] N. Sönnichsen, Solar power net generation in the United States from 2000 to 2019, <https://www.statista.com/statistics/183447/us-energy-generation-from-solar-sources-from-2000>.
- [26] The Freedonia, Group, Inc. World equipment demand, Celeveland, OH, USA; 2015 <https://www.freedoniagroup.com>.
- [27] Alka Solanki, Yash pal, Applications of flat plate collector in dairy industries: A review, International Journal of Ambient Energy. <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1721326>.
- [28] Francis Agyenim, Ian Knight, Michael Rhodes, Design and experimental testing of the performance of an outdoor LiBr/H<sub>2</sub>O solar thermal absorption cooling system with a cold store. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.01.013>.
- [29] Sheikhani H, Barzegarian R, Heydari A, Kianifar A, Kasaeian A, Grof ´ G, et al. A review of solar absorption cooling systems combined with various auxiliary energy devices. J Therm Anal Calorim 2018;134:2197–212. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7423-4>.
- [30] Ghafoor A, Munir A. Worldwide overview of solar thermal cooling technologies. Renew Sustain Energy Rev 2015;43:763–74. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.073>.
- [31] Kasaeian A, Bellos E, Shamaeizadeh A, Tzivanidis C. Solar-driven polygeneration systems: recent progress and outlook. Appl Energy 2020;264. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114764>.
- [32] Asdrubali, F., Grignaffini, S., 2005. Experimental evaluation of the performances of a LiBr/H<sub>2</sub>O absorption refrigerator under different service conditions. International Journal of Refrigeration 28, 489–497.
- [33] Auh, P.C., 1978. An overview of absorption cooling technology in solar applications. In: Proceedings of the 3rd Workshop on the Use of Solar Energy for Cooling of Buildings, San Francisco, California, pp. 14–18.
- [34] Sumathy, K., Huang, Z.C., Li, Z.F., 2002. Solar absorption cooling with low grade heat source – a strategy of development in south china. Solar Energy 72 (2), 155–165.

- [35] Hammad M, Zurigat Y. Performance of a second generation solar cooling unit. *Solar Energy* 1998;62(2): 79–84
- [36] IEA Solar Heating and Cooling Programme. Task 38 (Solar Air conditioning and Refrigeration, 2006–2011). <<http://www.ieashc.org/task38/index.html>>.
- [37] Henning H-M. *Solar assisted air-conditioning in buildings – a handbook for planners*. Wien: Springer; 2004. ISBN3-211-00647.
- [38] Fong KF, Chow TT, Lee CK, Lin Z, Chan LS. Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city. *Solar Energy* 2010;84: 227–44.
- [39] Praene JP, Marc O, Lucas F, Miranville F. Simulation and experimental investigation of solar absorption cooling system in Reunion Island. *Appl Energy* 2011;88:831–9.
- [40] Agyenim F, Knight I, Rhodes M. Design and experimental testing of the performance of an outdoor LiBr/H<sub>2</sub>O solar thermal absorption system with a cold store. *Sol Energy* 2010;84:735–44.
- [41] . A. Buonomano, F. Calise, A. Palombo, Solar heating and cooling systems by CPVT and ET solar collectors: A novel transient simulation model. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.023>.
- [42] Lattieff, F.A., Atiya, M.A., Al-Hemiri, A.A., 2019. Test of solar adsorption air-conditioning powered by evacuated tube collectors under the climatic conditions of Iraq. *Renewable Energy* 142, 20–29
- [43] Sami M. Alelyani A, Weston K. Bertrand A, Zhaoli Zhang B, Patrick E. Phelan, Experimental study of an evacuated tube solar adsorption cooling module and its optimal adsorbent bed design. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.044>.
- [44] Ghaddar NK, Shihab M, Bdeir F. Modeling and simulation of solar absorption system performance in Beirut. *Renewable Energy* 1997;10(4):539–58.
- [45] . F. Assilzadeha., S.A. Kalogiroub, Y. Alia, K. Sopiana, Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.017>.
- [46] Jebasingh VK, Herbert GMJ. A review of solar parabolic trough collector. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;54:1085–91. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.043>.
- [47] Cabrera FJ, Fernandez-García ´ A, Silva RMP, P´ erez-García M. Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;20:103–18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.081>.
- [48] Lokurlu A, Richarts F, Krüger D. High efficient utilisation of solar energy with newly developed parabolic trough collectors (SOLITEM PTC) for chilling and steam production in a hotel at the Mediterranean coast of Turkey. *Int J Energy Technol Policy* 2005;3:137–46. <https://doi.org/10.1504/IJETP.2005.006745>.
- [49] Qu M, Yin H, Archer DH. A solar thermal cooling and heating system for a building: experimental and model based performance analysis and design. *Sol Energy* 2010;84:166–82. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.010>.
- [50] Buonomano A, Calise F, D’Accadia MD, Ferruzzi G, Frascogna S, Palombo A, et al. Experimental analysis and dynamic simulation of a novel high-temperature solar cooling system. *Energy Convers Manag* 2016;109:19–39. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.047>.
- [51] Li M, Xu C, Hassanien RHE, Xu Y, Zhuang B. Experimental investigation on the performance of a solar powered lithium bromide–water absorption cooling system. *Int J Refrig* 2016;71:46–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.07.023>.

- [52] Soussi M, Balghouthi M, Guizani AA, Bouden C. Model performance assessment and experimental analysis of a solar assisted cooling system. *Sol Energy* 2017;143:43–62. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.046>.
- [53] Zhang HL, Baeyens J, Degrève J, Cacères G. Concentrated solar power plants: review and design methodology. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2013;22:466–81.
- [54] Lazzarin RM. Solar cooling: PV or thermal? A thermodynamic and economical analysis. *Int J Refrig* 2014;39:38–47.
- [55] Mittal V, Kasana KS, Thakur NS. The study of solar absorption air-conditioning systems. *J. Energy S Afr* 2005;16..
- [56] Kaushik SC, Arora A. Energy and exergy analysis of single effect and series flow double effect water–lithium bromide absorption refrigeration systems. *Int J Refrig* 2009;32(6):1247–58.
- [57] Aliane A, Abboudi S, Seladji C, Guendouz B. An illustrated review on solar absorption cooling experimental studies. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2016;65:443–58.
- [58] Fadi A. Ghaith, Haseeb-ul-Hassan Razzaq. Performance of solar powered cooling system using Parabolic Trough Collector in UAE” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.08.005>.
- [59] Rossetti A, Paci E, Alimonti G. Experimental analysis of the performance of a medium temperature solar cooling plant. *Int J Refrig* 2017;80:264–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.05.002>
- [60] Galindo-Luna YR, Gomez-Arias ´ E, Romero RJ, Venegas-Reyes E, MontielGonzalez ´ M, Unland-Weiss HEK, et al. Hybrid solar-geothermal energy absorption air-conditioning system operating with NaOH-H<sub>2</sub>O-Las tres vírgenes (Baja California Sur), “La Reforma” case. *Energies* 2018;11.. <https://doi.org/10.3390/en11051268>.
- [61] Luna YRG, Franco WRG, Carrasco UD, Domínguez RJR, García JCJ. Integration of the experimental results of a parabolic trough collector (PTC) solar plant to an absorption air-conditioning system. *Appl Sci* 2018;8. <https://doi.org/10.3390/app8112163>.
- [62] Kalogirou SA. Solar thermal collectors and applications. vol. 30. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>.
- [63] Jiaqiang E, Liu G, Liu T, Zhang Z, Zuo H, Hu W, et al. Harmonic response analysis of a large dish solar thermal power generation system with wind-induced vibration. *Sol Energy* 2019;181:116–29. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.089>.
- [64] Zuo H, Liu G, Jiaqiang E, Zuo W, Wei K, Hu W, et al. Catastrophic analysis on the stability of a large dish solar thermal power generation system with wind-induced vibration. *Sol Energy* 2019;183:40–9. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.003>.
- [65] Design of Solar Dish collector for vapor absorption refrigeration system. *International Journal of Civil Engineering and technology*.
- [66] Rafał Figaj, Mateusz Szubel, Estera Przenzak, Mariusz Filipowicz “Feasibility of a small-scale hybrid dish/flat-plate solar collector system as a heat source for an absorption cooling unit”.
- [67] Mehrdad Moradi A, Mehdi Mehrpooya, Optimal design and economic analysis of a hybrid solid oxide fuel cell and parabolic solar dish collector, combined cooling, heating and power (CCHP) system used for a large commercial tower. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.001>.
- [68] Su B, Han W, Zhang X, Chen Y, Wang Z, Jin H. Assessment of a combined cooling, heating and power system by synthetic use of biogas and solar energy. *Appl Energy* 2018;229:922–35. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.037>.

- [69] Figaj R, Szubel M, Przenzak E, Filipowicz M. Feasibility of a small-scale hybrid dish/flat-plate solar collector system as a heat source for an absorption cooling unit. *Appl Therm Eng* 2019;163:114399. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114399>.
- [70] Begum SN, Kiran CR, Vasundara K. Design analysis and fabrication of solar vapour absorption. *Int J Innov Technol Explor Eng* 2019;8:371–6. <https://doi.org/10.35940/ijtee.I3068.0789S319>.
- [71] Bianchini A, Guzzini A, Pellegrini M, Saccani C. Performance assessment of a solar parabolic dish for domestic use based on experimental measurements. *Renew Energy* 2019;133:382–92. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.046>.
- [72] Ghaith FA, Razaq H ul H. Performance of solar powered cooling system using Parabolic Trough Collector in UAE. *Sustain Energy Technol Assessments* 2017;23: 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.08.005>.
- [73] Franchini G, Brumana G, Perdichizzi A. Performance prediction of a solar district cooling system in Riyadh, Saudi Arabia – a case study. *Energy Convers Manag* 2018;166:372–84. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.048>.
- [74] H.H. El-Ghetany , M.A. Omara , R.G. Abdelhady , Gamal B. Abdelaziz. Design of silica gel/water adsorption chiller powered by solar energy for air conditioning applications, *Journal of Energy Storage* 63 (2023) 107055. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107055>
- [75] A. Mostafa, M. Hassanain, E. Elgendy, Transient simulation and design parameters optimization of a cold store utilizes solar assisted adsorption refrigeration system, *Case Stud. Therm. Eng.* 37 (2022), 102273.
- [76] M. Hassan, I.I. El-Sharkawy, K. Harby, Study of an innovative combined absorption-adsorption cooling system employing the same evaporator and condenser, *Case Stud. Therm. Eng.* 42 (2023), 102690.
- [77] V. Cardoso-Fernandez a, A. Bassam b, O. May Tzuc c., M.A. Barrera Ch. d, Jorge de Jesús Chan-Gonzalez c, M.A. Escalante Soberanis b, N. Velazquez-Lim one, Luis J. Ricalde b. Global sensitivity analysis of a generator-absorber heat exchange (GAX) system’s thermal performance with a hybrid energy source: An approach using artificial intelligence models, *Applied Thermal Engineering* 218 (2023) 119363. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119363>
- [78] O. May Tzuc, J.J. Chan-Gonzalez, I.E. Castaneda-Robles, F. Lezama-Z , M. Moheno-Barrueta, M. Jim´ Torres, R. Best, Multivariate inverse artificial neural network to analyze and improve the mass transfer of ammonia in a Plate Heat Exchanger-Type Absorber with NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O for solar cooling applications, *Energy Explor. Exploit.* 40 (6) (2022) 1686–1711.
- [79] S.M.S. Mahmoudi, A.D. Akbari, M.A. Rosen, A novel combination of absorption heat transformer and refrigeration for cogenerating cooling and distilled water: Thermoeconomic optimization, *Renew. Energy* 194 (2022) 978–996
- [80] Ashwni, Ahmad Faizan Sherwani. Analysis of solar energy driven organic Rankine cycle-vapor compression refrigeration system, *Thermal Science and Engineering Progress* 35 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101477>
- [81] Asad A. Naqvi, Ahsan Ahmed & Talha Bin Nadeem. Efficiency Improvement of Photovoltaic Module by Air Cooling Applied Solar Energy volume 57, pages 517–522 (2021)
- [82] Ahsan Ahmed, Talha Bin Nadeem, Asad A. Naqvi , Mubashir Ali Siddiqui , Muhammad Hamza Khan , Muhammad Saad Bin Zahid , Syed Muhammad Ammar. Investigation of PV utilizability on university buildings: A case study of Karachi, Pakistan, *Renewable Energy*, August 2022 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.006>

[83] Ahsan Ahmed, Asad A. Naqvi, Talha Bin Nadeem & Muhammad Uzair. Performance of the Photovoltaic Modules: a Case Study of Karachi, Pakistan Applied Solar Energy volume 57, pages370–376 (2021).

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

AS ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MU ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

# Material Modelling and Failure Study of Different Fiber Reinforced Composites for Pressure Vessel

*Modelado de Materiales y Estudio de Fallas de Diferentes Compuestos Reforzados con Fibra para Recipientes a Presión*

*Modelagem de Materiais e Estudo de Falha de Diferentes Compósitos Reforçados com Fibras para Vasos de Pressão*

Atif Shazad <sup>1</sup>, Junaid Jadoon <sup>2</sup>, Muhammad Uzair <sup>3</sup>, Muhammad Muzammil <sup>4</sup>

Recibido: 21/03/2023

Aceptado: 22/05/2023

**Summary.** - Pressure vessels are essential industrial tools regarding storage of high-pressure fluids. Utilization of pressure vessels in ordinary industrial environment impose serious dangers to human life in case of failure. Manufacturing material and working pressure as per material's strength are necessary arguments for a pressure vessel designer. In this study, five composite materials are selected to investigate the behavior of pressure vessels under high pressure. FEA technique is used to check stresses and deformations in different composite layers. Pressure applied to all materials models in this study is around 20 MPa. Tsai Wu and Maximum stress theories are used to study failure in first two composite layers of different composite materials. Glass Epoxy composites perform well in terms of static loading failure. They demonstrate reasonable strength without experiencing failure in the second layer. T300/976 composites are also suitable for the intended loading conditions of the model because did not exhibit second layer failure, making them a viable option. Therefore, it is recommended to use Glass/Epoxy and T300/976 composites in extreme pressure conditions such as those found in CNG cylinders. Three of the composite materials tested did not satisfy the failure theories. Hence, it is not safe to use them in extreme loading conditions. Although these materials did not show any failure in the first layer, deformations in the second layer made them susceptible to failure.

**Keywords:** Pressure Vessels; Reinforced Composites; Fiber Composites; Modelling.

**Resumen.** - Los recipientes a presión son herramientas industriales esenciales para el almacenamiento de fluidos a alta presión. La utilización de recipientes a presión en el entorno industrial ordinario impone serios peligros para la vida humana en caso de falla. El material de fabricación y la presión de trabajo según la resistencia del material son argumentos necesarios

---

<sup>1</sup> Lecturer, atifshahzad2717@gmail.com, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Pakistan, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3277-7901>

<sup>2</sup> Lecturer, junaid@mailinator.com, Department of Mechanical Engineering Pakistan Institute of Engineering & Applied Sciences (PIEAS), Pakistan, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6217-1962>

<sup>3</sup> Associate Professor, uzair@neduet.edu.pk, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Pakistan, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2033-6244>

<sup>4</sup> Lecturer, muzamil@neduet.edu.pk, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Pakistan, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8380-0502>



para un diseñador de recipientes a presión. En este estudio, se seleccionan cinco materiales compuestos para investigar el comportamiento de los recipientes a presión bajo alta presión. La técnica FEA se utiliza para comprobar tensiones y deformaciones en diferentes capas compuestas. La presión aplicada a todos los modelos de materiales en este estudio es de alrededor de 20 MPa. Las teorías de Tsai Wu y la tensión máxima se utilizan para estudiar la falla en las dos primeras capas compuestas de diferentes materiales compuestos. Los compuestos de epoxi de vidrio funcionan bien en términos de falla de carga estática. Demuestran una fuerza razonable sin experimentar fallas en la segunda capa. Los compuestos T300/976 también son adecuados para las condiciones de carga previstas del modelo porque no presentaron fallas en la segunda capa, lo que los convierte en una opción viable. Por lo tanto, se recomienda utilizar compuestos de vidrio/epoxi y T300/976 en condiciones de presión extrema, como las que se encuentran en los cilindros de GNC. Tres de los materiales compuestos probados no cumplieron con las teorías de falla. Por lo tanto, no es seguro usarlos en condiciones de carga extremas. Si bien estos materiales no presentaron falla alguna en la primera capa, las deformaciones en la segunda capa los hicieron susceptibles a la falla.

**Palabras clave:** Recipientes a presión; Compuestos Reforzados; Compuestos de Fibra; Modelado

**Resumo.** - Vasos de pressão são ferramentas industriais essenciais para o armazenamento de fluidos sob alta pressão. A utilização de vasos de pressão em ambiente industrial comum impõe sérios perigos à vida humana em caso de falha. O material de fabricação e a pressão de trabalho de acordo com a resistência do material são argumentos necessários para um projetista de vasos de pressão. Neste estudo, cinco materiais compósitos são selecionados para investigar o comportamento de vasos de pressão sob alta pressão. A técnica FEA é usada para verificar tensões e deformações em diferentes camadas compostas. A pressão aplicada a todos os modelos de materiais neste estudo é de cerca de 20 MPa. As teorias de Tsai Wu e tensão máxima são usadas para estudar a falha nas duas primeiras camadas compostas de diferentes materiais compostos. Os compósitos de vidro epóxi têm bom desempenho em termos de falha de carga estática. Eles demonstram resistência razoável sem sofrer falha na segunda camada. Os compósitos T300/976 também são adequados para as condições de carregamento pretendidas do modelo, pois não apresentaram falha na segunda camada, tornando-os uma opção viável. Portanto, recomenda-se a utilização dos compósitos Vidro/Epóxi e T300/976 em condições extremas de pressão como as encontradas em cilindros de GNV. Três dos materiais compósitos testados não satisfizeram as teorias de falha. Portanto, não é seguro usá-los em condições extremas de carregamento. Embora esses materiais não apresentassem nenhuma falha na primeira camada, as deformações na segunda camada os tornavam suscetíveis à falha.

**Palavras-chave:** Vasos de Pressão; Compósitos Reforzados; Compósitos de Fibra; Modelagem

**1. Introduction.** - Failure of pressure vessel is very deleterious because failure results in catastrophic bursting of vessel. Safety of pressure vessel is a chief concern due its utilization in different sectors either commercial or domestic. Mostly fracture occurred due material failure. Determination of performance of material under loading conditions is at primacy while designing load bearing equipment's. It is very understood that no material superseded the accident or failure, but selection of material is essential for durability of component, good materials increase life span of component. Metals are showing excellent mechanical properties, but greater density is a hinderance to use them in certain applications. Combination of distinguished properties are evidenced in composite structures due jumble of two different category materials. Utilization of composite materials are very enormous under extreme loading conditions, extensive pressure bearing bodies like fuel tanks etc. The current world is now shifting to composite due its low density to strength ratio, high abrasion, and corrosion resistance in toxic environments. The aerospace studies revealed the application of composite in fuel tanks of space launch vehicles which highly advantageous due low weight. Transport and other commercial sectors are migrating towards composite based vessels. composite material CNG cylinders are easily available in local market. [1]

Afthab Afrathim et al [2] investigated failure of first ply for thin composite pressure vessel. Basalt fiber composite was used to study the burst pressure of pressure vessel first ply. Ansys software was used for simulations and Tsai Wu criteria was used to predict the failure. It was suggested that basalt fiber in comparison with E-glass/Epoxy shown eminent behave under burst pressure of first ply failure. E.S. Barboza et al [3] studied the failure criteria of vessel liner LLDPE and HDPE material, Finite Element Modelling was adapted to reveal the material behave under loading. Burst pressure could be retained in pressure vessel of thickness 15mm. J.P.Xu et al. and J.C Choi et al. [4,14] performed different approaches to attain best suited results under excessive pressure in tanks. Carbon fibers embedded in Epoxy was tested under burst loading in hydrogen gas cylinders. Results disclosed that Tsai-Wu criteria was predicting most precise failure pressure. Gaurav Singh et al [5] studied impacts of Kevlar with HDPE liner in pressure vessel. Ansys software results shown that 35° layers orientation was appropriate due to minimal deformations. Shah Alam et al [6] conducted study on low-speed impact in pressure vessel. Study mainly focused on residual burst strength and dynamic response of Type IV overwrapped vessel. Results disclosed that Hashin Fiber tension failure were greater in inner layer but less than 1.

Marino Quaresimin et al [7] discussed low velocity impact on laminates of composite material. Author affirmed about matrix control over commencement of failure and minimal value of load for Delamination. Both parameters were not reliant on lay-up sequence however depended on laminate thickness. Absorption ability was influenced by both stacking sequence and laminate thickness. D.J.Chang & O S Sachin et al. [8,15] investigated failure modes of graphite Epoxy vessel pressurized internally. Cut introduced intentionally to study the effects of leakage, burst and fracture. Results shown that burst pressure and impact load were inversely proportional. S.Takalkar et al [9] studied winding angles and shown that winding angles achieved good results after altering the material regarding deformation of fibers under pressure, generation of stress and stress raiser areas and failure of material. Selected material was carbon T300/epoxy evaluated in workbench and results compared by laminate theory.

Caprino et al. & C Red [10,16] studied the effect of threshold energy with respect to delamination. Author discussed energy storage at first failure and represented elastic model most accurate. V.V Vasiliev et al [11,17] performed fiber reinforcing in one direction to attain minimal weight of vessel. Comparison of two techniques of winding was performed, author shown that geodesic

winding was intricate than circumferential winding. M.Z.Kabir [12] investigated the effect of stress distribution over head of pressure vessel. optimization between different shapes were performed for uniform stress distribution. Different shapes of mandrel were suggested to perform optimization of shapes of dome profile. Different researchers [13-19] used Vinylester as a matrix with carbon fibers utilized for pressure vessel. Different winding angle was studied to investigate the suitable properties, loading conditions were severe like pressure applied to bursting limits for checking the performance behavior of new material. Study evidenced carbon/vinylester composite showing good results regarding to ultimate pressure in comparison with simple epoxy as matrix.

The evaluation of cylinders with various composite materials and the prevention of failure in different layers are of paramount importance due to their direct impact on society. To ensure public safety, extensive research has been conducted on different composite materials under extreme loading conditions, specifically focusing on burst pressures in compressed natural gas (CNG) cylinders. By assessing various failure criteria, this research aimed to investigate the layer failure of different composite materials subjected to the same static loading conditions.

A theoretical approach was adopted to establish limits for the safe working of different composite materials used in CNG cylinders, ultimately prioritizing public safety. This research primarily relied on stress analysis techniques and failure theories specific to composite materials. By employing these analytical tools, researchers sought to identify the most suitable material with the desired properties necessary for the construction of CNG cylinders.

**2. Failure Theories.** – The condition of failure criteria [14] described failure in each layer of composite laminate, governing equations are,

$$F_i \sigma_i + F_{ii} \sigma_i \sigma_j \geq 1$$

$$F_2 = F_3 = F_4 = F_5 = F_6 = 0 \quad F_{22} = F_{33} \quad F_{55} = F_{66} \quad F_{12} = F_{13}$$

Tsai Wu failure criteria can be written as

$$F_1 \sigma_1 + F_2 (\sigma_2 + \sigma_3) + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} (\sigma_2^2 + \sigma_3^2) + 2F_{12} (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1 \sigma_3) + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + F_{44} \sigma_{23}^2 + F_{55} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) \geq 1$$

Where  $\sigma_i$  is stress and  $F_{ii}$  are the strength coefficients and E, G and  $\nu$  are the elastic constants.

$$F_{11} = \frac{1}{x_t x_c}$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c}$$

$$F_{44} = \frac{1}{S_{23}^2}$$

$$F_{55} = \frac{1}{S_{12}^2}$$

$$F_1 = \frac{1}{x_t} - \frac{1}{x_c}$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}}$$

Maximum Stress failure criteria represented below [15],

$$\frac{\sigma_1}{X_t} \geq 1, \frac{\sigma_2}{Y_t} \geq 1$$

For Compression

$$\frac{\sigma_1}{X_c} \geq 1, \frac{\sigma_2}{Y_c} \geq 1$$

For Shear

$$\frac{|\tau_{12}|}{S} \geq 1$$

$X_t, X_c$ , explained tensile and compressive strength in the longitudinal.  $Y_t, Y_c$  is called tensile and compressive strength in the transverse direction.  $S_{12}, S_{23}$  shear strength of fiber in longitudinal and transverse direction.

**3. Methodology.** - The methodology employed in this study encompassed two distinct research approaches. The first approach involved conducting von Mises stress analysis using finite element analysis (FEA) on various composite materials. To accomplish this, ANSYS Parametric Design Language (APDL) was utilized with the implementation of shell elements. The primary objective of this analysis was to determine the distribution and magnitude of von Mises stresses within the different layers of the composite materials. The second research approach focused on assessing the failure response of the composite materials under uniform static loading conditions. To achieve this, well-established criteria such as the Tsai-Wu criterion and the Maximum stress criterion were utilized. The intention was to evaluate the potential failure modes and overall structural integrity of the composite materials.

To fulfill these objectives, a diverse range of materials underwent FEA analysis. By employing this computational technique, the researchers were able to thoroughly investigate and analyze the Von Mises stresses within each layer of the composite materials. This comprehensive analysis yielded valuable insights into the distribution and concentration of stress, thereby facilitating a deeper understanding of the structural behavior and potential failure mechanisms of the composite materials under investigation.

- a. E glass/Epoxy composite
- b. Glass/Epoxy composite
- c. Carbon/Epoxy
- d. Kevlar/Epoxy
- e. T300/976 composite

Mechanical Properties are listed in Table 1 of selected composite materials, E and G are in GPa and units of the density are kg/m<sup>3</sup>. X, Y and Z are longitudinal and transverse directions, and  $\nu$  represents Poisson's ratio.

Mechanical Properties of Different Composite Materials (E and G units are in GPa)					
Properties	E Glass/Epoxy	Glass/Epoxy	Carbon/Epoxy	Kevlar/Epoxy	T300/976
$E_X$	33.189	20.6	169	28.5	133
$E_Y$	7.132	17.2	9	27	9.24
$E_Z$	7.132	17.2	9	27	9.24
$\nu_{xy}$	0.26	0.112	0.31	0.05	0.318
$\nu_{yz}$	0.26	0.117	0.31	0.489	0.318
$\nu_{xz}$	0.26	0.114	0.31	0.5	0.318
$G_{xy}$	6.313	17.3	6.5	1.96	6.27
$G_{yz}$	6.313	7.699	6.5	12.89	6.27
$G_{xz}$	6.313	7.699	6.5	1.96	6.27
$\rho$	1630	1900	1745	1400	1630

Table I. Mechanical Properties of Composite Materials.

Parameter	Dimensions (mm)
Overall length	800
Cylinder length	590
Opening diameter	40
Inner shell radius	90
Outside radius	108
Thickness	18
Dome Inner radius	90
Dome outer radius	108

Table II. Geometry details of pressure vessel.

**4. Boundary Conditions.** - Pressure vessel including all material models constrained at the nozzle ends. Boundary conditions were same for all vessels, pressure vessel was restrained axially at both ends hence no displacement condition was allocated. Meshing in APDL was adopted for composite shell as shown in Figure I. Element type SHELL281 was selected having 8 nodes and having mid nodes as well. It is appropriate for thin to thick structures. Geometry details are given in Table II.

The shell structure was covered with composite layers, consisting of 144 symmetrical cross ply laminates with orientations ranging from 0° to 90°. The overall thickness of the structure was 18 mm. Figure I clearly shows the stacking of six layers, with the first layer at 0° and the second and third layers at 90°, confirming the symmetrical cross ply arrangement of all 144 layers.

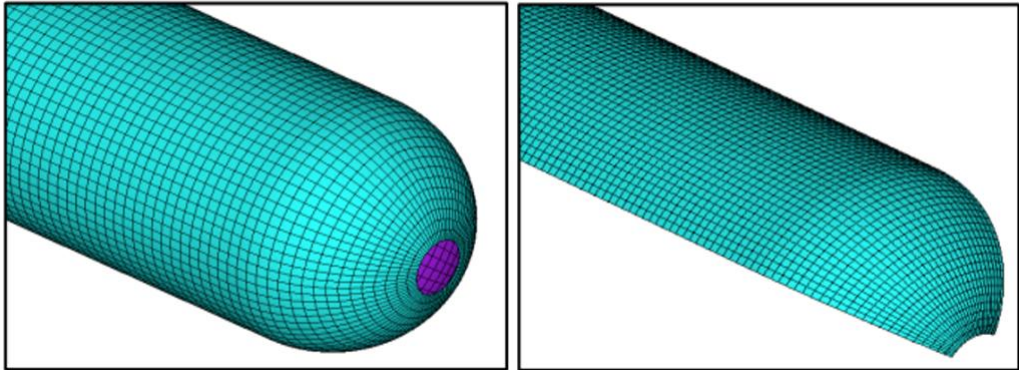


Figure I. Meshing of Full and 90° rotated Pressure vessel.

**5. Results and Discussions. –**

**5.1 E Glass/Epoxy Von Mises stresses.** - E glass/epoxy was used as 144 layer stacked in different orientations between 0 to 90°. First layer was oriented longitudinally, and second layer was in transverse orientation.

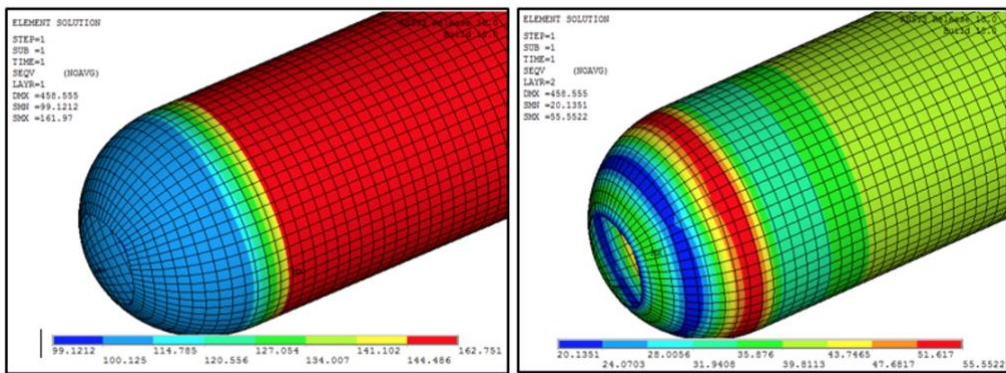


Figure II. Von Mises stresses in E glass/Epoxy (a) Layer 1. (b) Layer 2.

Composite must have high strength and low ductility as compared to the matrix used for the composite. Mechanical properties of E glass/epoxy tabulated in Table1. Von Mises stress distributions were plotted for the geometry with the E Glass/Epoxy composite system as shown in Figure II. Maximum stresses were in the cylindrical region for layer 1 in range of 144 to 162 MPa, and in dome region maximum stressed were in range of 100 to 127 MPa. Stresses in cylindrical region were in range of 34 to 44 MPa for layer 2 and in dome region stresses were in range of 20 to 51 MPa. Maximum stresses occurred at the junction region of the cylindrical and the spherical dome region. Stresses in junction were maximum having value of 55.55 MPa for layer 2.

**5.2 Glass/Epoxy Von Mises stresses.** - Mechanical properties of Glass/Epoxy composite material is listed in Table 1. Von Mises stress distributions are plotted for the geometry with the Glass/Epoxy composite system as shown in Figure 3. Maximum stresses in cylindrical region for layer 1 were in range of 95 to 102 MPa, in the dome region Maximum stressed were in range of 43 to 68 MPa.

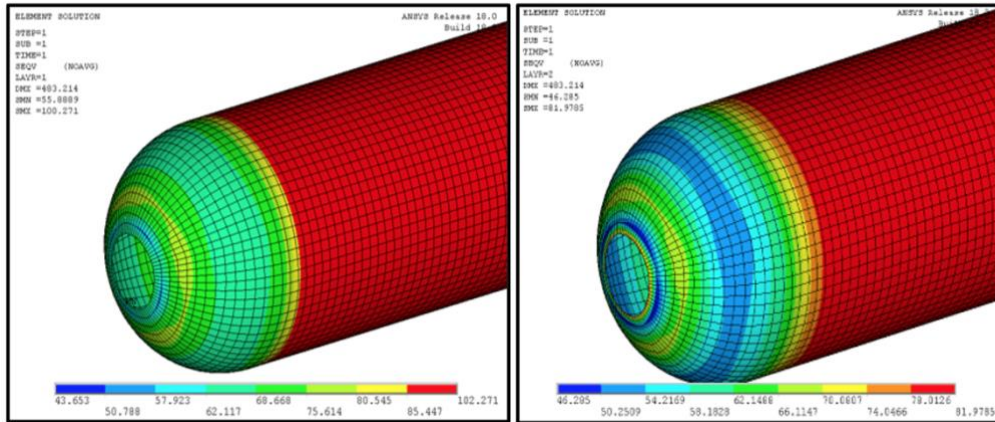


Figure III. Von Mises stresses in Glass/Epoxy (a) Layer 1. (b) Layer 2.

For layer 2 Maximum stress in cylindrical region were in range of 74 to 81 MPa and in dome region stresses were in range of 46 to 62 MPa. Maximum stresses occurred in cylindrical section in both layers.

**5.3 Carbon/Epoxy Von Mises stresses.** -

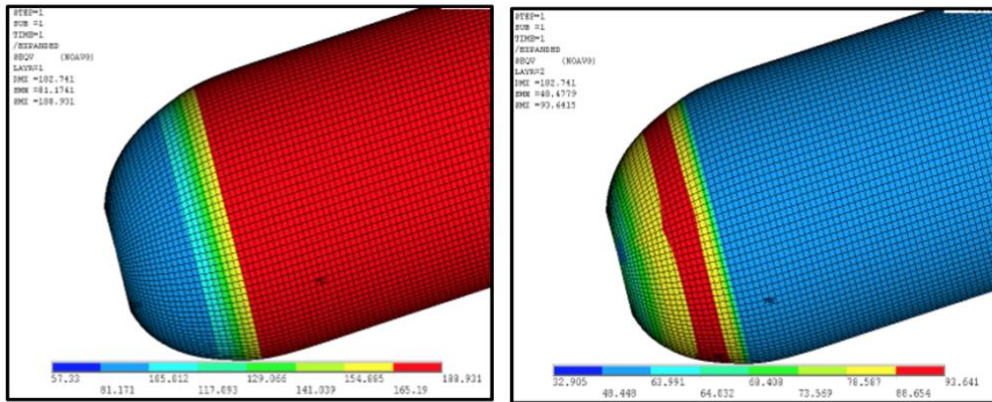


Figure IV. Von Mises stresses in Carbon/Epoxy (a) Layer 1. (b) Layer 2.

Von Mises stresses are shown in Figure IV, Maximum stresses were in cylindrical region for layer 1. Stresses were in range of 165 to 188 MPa. In the dome region stresses were in range of 57 to 81 MPa. Stresses were relatively high in the junction region as compared to the dome having maximum value of 105 MPa. For layer 2 stresses in cylindrical section were in range of 32 to 40

MPa and in dome region stresses were in the range of 73 to 93 MPa. Maximum stresses occurred in the junction region of the cylindrical and the spherical dome region. Stresses in junction were maximum having the value of 94 MPa for layer 2.

**5.4 Kevlar/Epoxy Von Mises stresses. –**

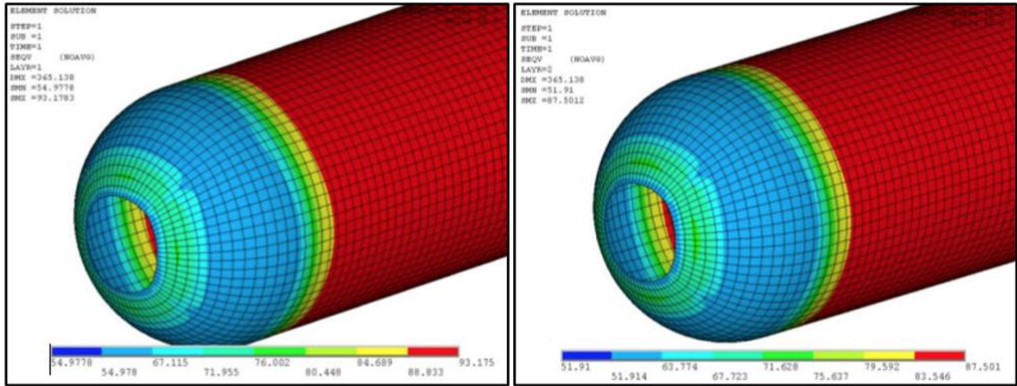


Figure V. Von Mises stresses in Kevlar/Epoxy (a) Layer 1. (b) Layer 2.

The Von Mises stresses are shown in Figure V, for layer 1 Maximum stresses were generated in cylindrical region in range of 89 to 93 MPa and dome region stresses were in range of 54 to 76 MPa. Stresses in cylindrical region were in range of 83 to 87 MPa and in dome region stresses were in range of 51 to 71 MPa. Maximum stresses occurred in cylindrical section in both layers. Mechanical properties of Kevlar/Epoxy are tabulated in Table I.

**5.5 T300/976 Von Mises stresses. –**

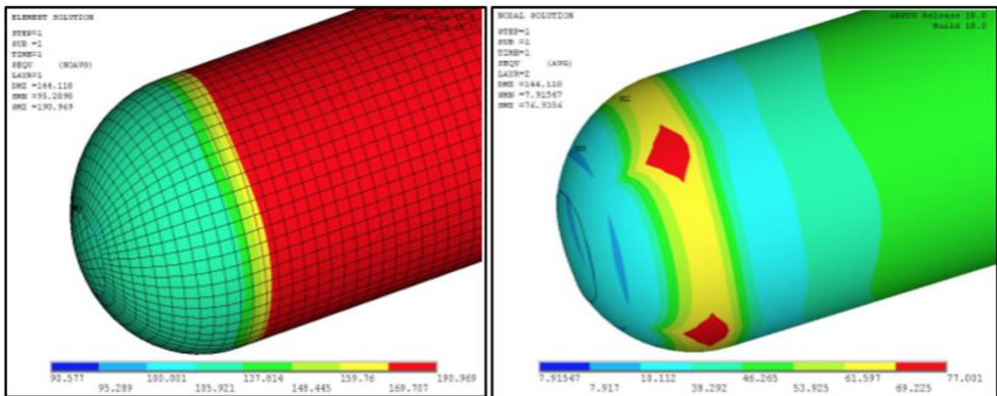


Figure VI. Von Mises stresses in T300/976 (a) Layer 1. (b) Layer 2.

Von Mises stress distributions are plotted for the geometry with T300/976 composite system as shown in Figure VI. Maximum stresses were in cylindrical region of layer 1 in range of 169 to 190 MPa and in dome region stresses were in the range of 100 to 140 MPa. Stresses were relatively



high in junction region as compared to dome. High stresses due to the change in fiber directions from the cylindrical region to spherical region of pressure vessel. Range of stresses in cylindrical region were 38 to 53 MPa and in dome region range of stresses were 7 to 79 MPa. Maximum stresses occurred in junction region of cylindrical and spherical dome region. Stresses in junction were maximum around 79 MPa of layer 2.

**5.6 Discussion of Failure Theories Results.** - The results of different composite systems were evaluated with respect to their ability of sustaining stresses and deformations in normal working conditions. Tsai Wu and maximum stress failure theories applied to the different composite systems. Based on results, some composites listed above were quite satisfactory while others would not be used due to their strength limitations. Strength of some of the composite systems is tabulated in the Table II. Longitudinal, shear and transversal properties of the composite systems are important for evaluation. Glass/Epoxy composite had approximately same strength in both the longitudinal and transverse directions.

This tells us about the suitability of the composite in these conditions. Carbon/Epoxy have high strength in reinforcement direction while the low strengths in transversal directions was unable to withstand the applied working pressures and failure observed in layer 2 of pressure vessel at the junction region. Failure analysis shown in Table III revealed results of detailed analysis of composite materials for high-pressure cylinders under normal working pressures. Tsai Wu, and Maximum Stress failure criterion were evaluated for the first two layers of the total 144 layers because they were under extreme loading in comparison of others.

Failure theories depicted values for each layer, Table III represented comparative study of failure theories data for both layers. It is indicated failure of layers under induced stresses and same working loads with fixed axial displacements. Boundary condition for each of the reduced model changes but overall theme remain same that is the axial displacement is fixed in each model and the symmetries are further applied to each of the model. Results variation is due to the variation of boundary conditions applied. It was conspicuous that only T300/976 and Glass/Epoxy composite systems can withstand the applied internal pressure while all the other systems failed in one or both of layers. Carbon/Epoxy can endure the pressure for the 1st layer but for the 2nd layer it failed according to the applied criterion. Carbon/Epoxy sustained internal pressure without failure for layer 1 but for layer 2 it was crashed. Kevlar/Epoxy was unable to sustain the internal pressure for both of layers and it failed according to the applied failure criterion. EGlass/Epoxy was capable to sustain internal pressure for layer 1 but layer 2nd failed as per defined failure criterion.

<b>Composite</b>	<b>Longitudinal Strength (MPa)</b>	<b>Transversal Strength (MPa)</b>	<b>Shear Strength (MPa)</b>
<b>Carbon/Epoxy</b>	2266	70	84.108
<b>Glass /Epoxy</b>	380	334	324
<b>T300 /976</b>	1427	39	90
<b>Kevlar /Epoxy</b>	1170	20.9	73
<b>EGlass/Epoxy</b>	743	23	69

*Table III. Strength Properties of Selected Composite Materials.*

Composite	Layer 1			Layer 2			
	Stresses (MPa)	Tsai Wu	Smax	Stresses (MPa)	Tsai Wu	Smax	Status
<b>Carbon/Epoxy</b>	183.4	0.12	0.08	121	2.01	1.73	<b>Layer 2 failure</b>
<b>Glass/Epoxy</b>	102.2	0.30	0.29	81.9	0.46	0.27	<b>No failure</b>
<b>Kevlar 49 /Epoxy</b>	93.1	2.11	2.03	87.5	7.2	4.67	<b>Both layers failure</b>
<b>E Glass/Epoxy</b>	162.7	0.68	0.82	55.5	1.7	1.63	<b>Layer 2 failure</b>
<b>T300 /976</b>	190	0.19	0.21	77	0.29	0.34	<b>No failure</b>

*Table IV. Failure Analysis of Different Composite Materials.*

**6. Conclusions.** - The results of the varying composites systems concluded that Glass Epoxy results are favorable in term of failure under static loading, Glass/Epoxy composite showing reasonable strength without failure of 2nd layer. T300/976 is also suitable as per loading conditions for required model because there was no 2nd layer failure in this Composite material. Total 5x Composite material evaluated under equal static pressure of 20 MPa but only two of them classify the theories of failure hence it is recommended to use Glass/Epoxy and T300/976 in extreme pressure conditions of CNG cylinders. 3x composite material failed to classify the failure theories hence it is not safe to utilize them in extreme conditions of loading, however these materials are not showing any failure in 1st layer, but deformations resulted in 2nd layer are susceptible to failure. Therefore, it is evaluated that other systems i-e Carbon/Epoxy, E Glass/Epoxy, Kevlar/Epoxy should not be used for the application as they will fail under the static structural analysis.

## 7. References. -

- [1] Muhammad Azeem, Hamdan Haji Ya, "Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review" *Journal of Energy Storage*, Volume 49 May 2022.
- [2] Afthab Afrathim, Saravanan Karuppanan, Santosh S. Patil, "Burst strength analysis of thin composite pressure vessels" *Materials Today: Proceedings* (44) [2021] 3115-3120.
- [3] E.S. Barboza Neto a, "Experimental and numerical analysis of a lldpe/hdpe liner for a composite pressure vessel," *Polymer Testing*, p. 693–700, 2011.
- [4] J. P.Xu, "Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels," *Materials and design*, pp. 2295-2301, 2009.
- [5] A. Gaurav Singh Chauhan, "Design and analysis of high-pressure composite vessels," *International Journal of Latest Engineering and Management Research (IJLEMR)*, pp. 96-102, June 2018
- [6] Shah Alam, Gregory Yandek, Richard Chris Lee, Joseph Mabry, "A study of residual burst strength of composite over wrapped pressure vessel due to low velocity impact" *International journal of Pressure Vessel and Piping* 194 (2021) 104511
- [7] Marino Quaresimin, Mauro Ricotta, Livio Martello, Stefano Mian, "Energy absorption in composite laminates under impact loading" *Composite: Part B* 44 (2013) 133-140.
- [8] D.J Chang "Burst Tests of Filament-wound Graphite-epoxy Tubes" *SAGE Journal of Composite Material*, May 2003.
- [9] S. Takalkar Atul S "Finite element analysis of composite overwrapped pressure vessel for hydrogen storage," in 2016 Intl. Conference on Advances in Computing, Communications, and Informatics (ICACCI), Jaipur, India, Sept. 21-24, 2016.
- [10] Goat Giancarlo, Langella Antonio , Lopresto Valentina, " Prediction of the first failure energy of circular carbon fiber reinforced plastic plates loaded at the center" *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34 (2003)
- [11] V.V.Vasiliev , A.A.Krikanov ,A.F.Razin " New generation of filament-wound composite pressure vessels for commercial applications" *Composite Structures*, Volume 62 Issues 3-4, 2003.
- [12] M. Z. Kabir, "Finite element analysis of composite pressure vessel with load sharing metallic liner," *Composite Structures* 49, pp. 247-255, 2000.
- [13] Yongzheng Shao, "High pressure strength of carbon fibre reinforced vinylester and epoxy vessels" *Composite Structures*, December 20.
- [14] J.C. Choi, S.Y. Jung, C. Kim, Development of an automated design system of a CNG composite vessel using a steel liner manufactured using the DDI process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 24 (2004) 781–788, <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1798-4>.
- [15] O.S. Sahin, A. Akdemir, A. Avci, L. Gemi, Fatigue Crack Growth Behavior of Filament Wound Composite Pipes in Corrosive Environment, *J. Reinf. Plast. Compos.* 28 (2009) 2957–2970, <https://doi.org/10.1177/0731684408094068>.
- [16] C. Red, The outlook for composite pressure vessels, *Compos. Technol.* 15 (2009). <https://www.compositesworld.com/articles/the-outlook-for-composite-pressure-vessels>. [Accessed October 24, 2021].
- [17] Opportunities for Composite CNG Tanks in Global Automotive Industry, *Lucintel. Com* (2020). <https://www.lucintel.com/composite-cng-tanks-in-automotive-2020.aspx>. [Accessed July 9, 2021]
- [18] B.G. Sumana, H.N.V. Sagar, M. Krishna, G.R. Rajkumar, Investigation of Burst Pressure on Carbon /Glass Fiber Reinforced Polymer Metal Tube for High Pressure Applications, *Procedia Mater. Sci.* 5 (2014) 535–539, <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.297>.
- [19] Atif Shazad, Junaid Jadoon, Muhammad Uzair, Maaz Akhtar, Abdul Shakoor, Muhammad Muzamil, and Mohsin Sattar (2022) Effect of composition and microstructure on the rusting of MS

rebars and ultimately their impact on mechanical behavior. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering. 46(4): 685-696. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2021-0207>

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

AS ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

JJ ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MU ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MM ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

# Sobre la especificación y verificación del patrón de programación paralela PCR en TLA+

*On the specification and verification of the PCR parallel programming pattern in TLA+*

*Sobre a especificação e verificação do padrão de programação paralela PCR em TLA+*

José E. Solsona<sup>1</sup>

Recibido: 26/05/2023

Aceptado: 26/05/2023

**Resumen.** - Limitaciones físicas en el diseño de microprocesadores han hecho que la industria de computadoras pase de mejorar la velocidad de un solo procesador a aumentar el número de unidades centrales de procesamiento. Pero el diseño de software para explotar la potencia de procesamiento paralelo de manera correcta y efectiva es una tarea desafiante que requiere un alto grado de experiencia. En 2017, Pérez y Yovine propusieron un patrón de programación paralela agnóstico de plataforma llamado PCR, que facilita la escritura de código paralelo. En este trabajo, formalizamos el patrón PCR en términos de TLA+ - un lenguaje de especificación formal para sistemas concurrentes que se está utilizando en lugares como Intel, Amazon y Microsoft. Buscamos proporcionar un marco formal principalmente para (1) expresar diseños PCR de alto nivel y probar su corrección funcional en el sentido de que su computación paralela calcula una función matemática dada, y (2) poder relacionar formalmente diferentes diseños PCR. De esta manera, contribuimos al estado del arte en la verificación formal de programas paralelos aprovechando las herramientas asociadas a TLA+ para probar propiedades sobre algoritmos PCR de alto nivel, como su corrección funcional y refinamiento.

**Palabras clave:** Algoritmos paralelos; Patrones de diseño; Métodos formales; TLA+

**Summary.** - Physical limitations in processor design have made the computer industry shift from improving the speed of a single processor to increasing the number of processing core units. But the design of software to exploit parallel processing power in a correct and cost-effective way is a challenging task requiring a high degree of expertise. In 2017, Pérez and Yovine proposed a platform-agnostic parallel programming pattern called PCR, that eases writing parallel code. In this work, we formalize the PCR pattern in terms of TLA+ - a formal specification language for concurrent systems that is being used at places such as Intel, Amazon and Microsoft. We seek to provide a formal framework mainly for (1) expressing high level PCR designs and prove their functional correctness in the sense that their parallel computation computes a given mathematical function, and (2) being able to formally relate different PCR designs. In this way, we contribute to the state of the art in formal verification of parallel programs by leveraging TLA+-related tools to

---

<sup>1</sup> Master en Ingeniería orientación Ciencias de la Computación. Universidad ORT Uruguay, solsona@ort.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8626-9569>

*proving properties about high-level PCR-based algorithms such as their functional correctness and refinement.*

**Keywords:** *Parallel algorithms; Design patterns; Formal Methods; TLA+*

**Resumo.** - *As limitações físicas no design do processador fizeram com que a indústria de computadores mudasse de melhorar a velocidade de um único processador para aumentar o número de unidades centrais de processamento. Mas o design de software para explorar o poder de processamento paralelo de maneira correta e econômica é uma tarefa desafiadora que requer um alto grau de especialização. Em 2017, Pérez e Yovine propuseram um padrão de programação paralela independente de plataforma chamado PCR, que facilita a escrita de código paralelo. Neste trabalho, formalizamos o padrão PCR em termos de TLA+ - uma linguagem de especificação formal para sistemas concorrentes que está sendo utilizada em locais como Intel, Amazon e Microsoft. Procuramos fornecer uma estrutura formal principalmente para (1) expressar designs de PCR de alto nível e provar sua correção funcional no sentido de que sua computação paralela calcula uma determinada função matemática e (2) ser capaz de relacionar formalmente diferentes designs de PCR. Dessa forma, contribuímos para o estado da arte na verificação formal de programas paralelos, aproveitando as ferramentas relacionadas ao TLA+ para provar propriedades sobre algoritmos baseados em PCR de alto nível, como correção e refinamento funcional.*

**Palavras-chave:** *Algoritmos paralelos; Padrões de design; Métodos Formais; TLA+.*

**1. Introducción.** - Limitaciones físicas en el diseño de los procesadores han hecho que la industria de computadoras pase, desde 2005, de mejorar la velocidad de un solo procesador a aumentar el número de unidades de procesamiento [1]. Este cambio de paradigma plantea para la ingeniería de software el desafío de proporcionar las herramientas apropiadas para construir software de manera efectiva que explote de manera correcta y eficiente el poder de procesamiento paralelo. Además de solucionar los conocidos problemas de la programación concurrente, como *deadlocks*, *livelocks* y *data races*, que son la causa de numerosos errores, el desarrollo de software para hardware paralelo exige considerar diferentes modelos de ejecución, tener conocimiento de las características de la plataforma subyacente e integrar código heredado que no siempre se puede reescribir fácilmente. Esta complejidad dificulta la ingeniería de software paralelo correcto y eficiente, requiriendo un alto grado de especialización.

En [2], Pérez y Yovine argumentaron que un enfoque agnóstico de plataforma de alto nivel basado en patrones de diseño ayudaría a abordar esas dificultades. Sin embargo, también señalaron que la mayoría de los enfoques existentes para el diseño basado en patrones carecía de semántica formal, lo que socavaba la posibilidad de abordar adecuadamente el aspecto de la corrección. Por lo tanto, propusieron el patrón de programación paralela PCR, para el cual dieron una semántica basada en FXML, un lenguaje formal teórico que utiliza órdenes parciales para interpretar computaciones paralelas, y mostraron cómo podría implementarse en un modelo de ejecución concreto. Pudieron respaldar a través de evidencia empírica que era posible generar un código paralelo eficiente basado en el enfoque mencionado. En cuanto a la corrección, aunque demostraron que las transformaciones realizadas por una herramienta prototipo eran correctas, no se preocuparon por probar la corrección de los PCR en sí mismos. Además, FXML no tiene herramientas asociadas que puedan usarse para ayudar en la verificación formal.

En este trabajo, buscamos proporcionar un marco formal principalmente para (1) expresar diseños de PCR de alto nivel y probar su corrección funcional en el sentido de que su computación paralela calcula una función matemática dada, y (2) ser capaz de relacionar formalmente diferentes diseños de PCR. En particular, que un PCR con “más paralelismo” implemente otro PCR con “menos paralelismo”, es decir, el primero es un refinamiento del segundo. Por razones prácticas, deseamos utilizar herramientas estándar para la verificación mecánica de las propiedades antes mencionadas, y creemos que es especialmente valioso que estas herramientas incluyan alguna forma de verificación automatizada (por ejemplo, *model-checking*) que permita una metodología rigurosa pero todavía liviana y apropiada para ser usada por los profesionales de la industria.

**2. El patrón PCR: productor, consumidor y reductor.**- Nuestra principal preocupación es el diseño de algoritmos paralelos correctos, con el fin de alcanzar los beneficios potenciales de la computación paralela sin sacrificar la corrección. Seguimos un enfoque basado en patrones de diseño, según el cual se deben desarrollar algoritmos paralelos sobre la base de algunos patrones de diseño específicos y bien entendidos susceptibles de análisis formal. El patrón PCR describe las computaciones concurrentes realizadas por productores, consumidores y reductores que se comunican entre sí, donde cada uno es una función básica, es decir, una función proporcionada por el usuario implementada en algún lenguaje anfitrión, o un PCR anidado. Aquí, presentamos una explicación informal e ilustrativa del patrón PCR.

**2.1 Descripción de alto nivel.**- El patrón PCR tiene como objetivo expresar computaciones en las que un productor recibe elementos de datos de entrada y genera, para cada uno de ellos, posiblemente muchas salidas que son consumidas por varios consumidores que trabajan en paralelo. Las salidas de todos ellos se agregan en un solo resultado por un reductor.

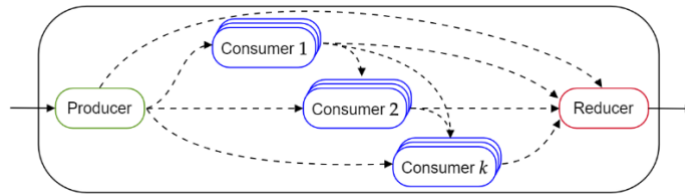


Figura I.- Vista pictórica del patrón de PCR.

El objetivo del patrón es enfatizar la independencia entre los diferentes cálculos, para exponer todas las oportunidades de paralelización. La Figura I representa la forma general de una PCR. Las flechas representan conexiones de datos en un PCR. Las flechas completas modelan la fuente de entrada externa y el canal de salida al entorno externo. La entrada externa está disponible para cualquier componente interno. Las flechas discontinuas indican canales de datos internos. Los ciclos de datos entre componentes internos no están permitidos: la red es en sí misma un grafo acíclico dirigido (DAG) del cual cualquier clasificación topológica tiene al productor y al reductor como el primer y último elemento, respectivamente. Las lecturas en los canales de datos no son destructivas; el mismo valor puede ser leído por cualquier consumidor y por el reductor.

El flujo de información dentro de un PCR es el siguiente: (1) Para cada elemento de datos de entrada, el componente productor genera un conjunto de valores de salida, cada uno de los cuales está inmediatamente disponible para su lectura. (2) Los componentes de consumo leen valores del alcance externo y de los canales de datos privados para realizar sus cálculos. (3) Un componente reductor combina valores de una o más fuentes de datos provenientes del productor y uno o más consumidores, generando un solo elemento de salida para cada elemento de entrada externo procesado por el productor.

Productor, consumidores y reductor trabajan en paralelo sujeto a las dependencias de datos existentes: todos los elementos de entrada deben estar disponibles para una instancia de productor, consumidor o reductor para realizar su cómputo. Cada productor, consumidor y reductor puede potencialmente generar tantas instancias de ejecución paralela como sea necesario para cualquier carga de trabajo específica. Se supone que tanto la naturaleza de una instancia de ejecución (proceso o subproceso local y/o remoto) como la política de programación están definidas por la implementación subyacente.

**2.2 Ejemplo: contar los primeros números Fibonacci primos.-** Consideremos el problema de contar los números primos entre los primeros  $N$  números de Fibonacci. La Figura II ilustra gráficamente cómo dos PCR pueden cooperar en una forma de composición para resolver este problema.

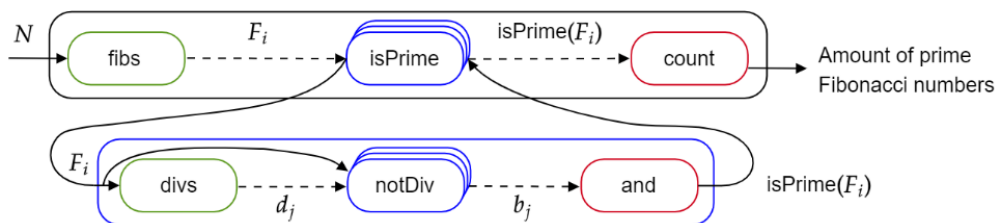


Figura II.- Solución PCR para contar números Fibonacci primos.



La solución PCR está diseñada para funcionar de la siguiente manera:

1. En el PCR externo, el productor `fib`s genera la secuencia  $F_1, F_2, \dots, F_N$  de los números de Fibonacci.
2. Para cada  $F_i$ , una instancia independiente del consumidor `isPrime` puede comprobar, en paralelo, su primalidad generando un resultado booleano. Esto constituye una oportunidad de anidamiento, en la que otro PCR interno puede paralelizar la subtarea de prueba de primalidad de la siguiente manera: (2.1) El productor `divs` genera todos los divisores posibles  $d_j$  de  $F_i$ . (2.2) Para cada  $d_j$ , una instancia independiente del consumidor `notDiv` puede verificar, en paralelo, la (no)divisibilidad de  $F_i$  por  $d_j$  generando un resultado booleano  $b_j$ . Este es un ejemplo de un consumidor que lee la salida del productor y también la entrada del PCR. (2.3) El reductor `and` calcula el resultado como la conjunción de todas las salidas  $b_j$  del consumidor.
3. El reductor `count` cuenta el número de salidas del consumidor que son verdaderas.

Esta solución admite la ejecución en paralelo en varios niveles. Muchas instancias de `isPrime` podrían ejecutarse simultáneamente según lo permitan las unidades de procesamiento disponibles y la tasa de producción de  $F_i$ . Además, cada instancia puede ser computada por un PCR interno con sus propias capacidades paralelas. Dado que las operaciones de reducción son asociativas (y conmutativas), también se pueden paralelizar.

**3. Modelo abstracto para el patrón PCR.-** Ahora presentamos un modelo abstracto de PCR, así como una sintaxis asociada. Este modelo debe ser fiel a la descripción informal, servir como una base rigurosa para razonar sobre PCR, pero lo suficientemente simple como para abstraerse de detalles como la arquitectura del hardware, *scheduling* de tareas o estrategias de implementación de reducción. Aquí nuestro objetivo es distinguir claramente, de la manera más abstracta y elemental posible, cómo computa un PCR (la concurrencia) de lo que computa el PCR (la entrada/salida esperada).

**3.1 El PCR básico.-** La computación de un PCR se rige por un espacio de iteración, un conjunto de índices (números naturales) posiblemente dependiente de la entrada sobre el que deberían actuar los componentes internos. Más precisamente, el espacio de iteración indexa los datos producidos y consumidos por los componentes del PCR (por ejemplo, para el ejemplo de Fibonacci es  $\{1, 2, \dots, N\}$ ). El resultado de cada operación de componente interno en cada índice se escribe en una variable de salida asociada. Específicamente, las variables de salida para el productor y los consumidores describen la historia completa de asignaciones en el espacio de iteración, modelando los canales de datos internos del PCR. Por lo tanto, pensamos en estas variables como flujos de valores matemáticamente representados por funciones parciales  $\mathbb{N} \rightarrow T$ , abreviado  $\vec{T}$ , para algún tipo de rango  $T$ . Si  $v$  es una variable de flujo, denotamos su  $i$ -ésimo elemento por  $v^i$  y por  $wrt(v^i)$  la condición de que se ha escrito  $v^i$ . La escritura en una variable de flujo puede ocurrir en cualquier orden. La naturaleza de flujo de las variables se puede aprovechar en un mecanismo sintáctico que permite que las operaciones de flujo *look-ahead/look-behind* se utilicen en variables mediante la indexación. El siguiente es el esquema general para un PCR básico.

Sea  $A$  un PCR básico con  $k$  consumidores. La computación de  $A$  sobre la entrada  $x$  consiste en las siguientes operaciones (asignaciones) para cada  $i \in I_x$  :

$$\begin{array}{ll}
 \textbf{Productor:} & p^i := f_p(x, p, i) \\
 \textbf{Consumidor 1:} & c_1^i := f_{c_1}(x, p, i) \\
 & \vdots \\
 \textbf{Consumidor } k: & c_k^i := f_{c_k}(x, p, c_1, \dots, c_{k-1}, i) \\
 \textbf{Reductor:} & r := r \otimes f_r(x, p, c_1, \dots, c_k, i)
 \end{array}$$

donde

- $I_x \subseteq \mathbb{N}$  es un conjunto de índices que representa el *espacio de iteración*. En general, depende de la entrada  $x$  y tiene la forma  $\{i \in lBnd(x) \dots uBnd(x) : prop(i)\}$  donde  $lBnd$  y  $uBnd$  denotan su límite inferior y superior respectivamente, y  $prop$  es una condición que actúa como filtro.
- $p, c_1, \dots, c_{k-1}$  y  $c_k$  son variables que representan las historias de valores calculados por el productor y los consumidores.
- $f_p, f_{c_1}, \dots, f_{c_k}$  y  $f_r$  son funciones básicas asociadas al productor, consumidores y reductor. En general, cada función básica puede consumir valores de variables de salida anteriores, lo que naturalmente induce un orden parcial que representa las dependencias de datos entre las operaciones de PCR.
- $\otimes$  es un combinador binario.  $r$  es una variable que representa el valor combinado (parcial), la salida del reductor. Su valor inicial viene dado por  $r_0(x)$ , al que a veces nos referimos como  $r_0$ . A diferencia de las variables de salida de los otros componentes,  $r$  es un escalar (es decir, no es una variable de flujo) y el orden de reducción con respecto a  $I_x$  no está especificado.

Se asume que todas las asignaciones, funciones básicas y operaciones de reducción son atómicas. Excepto cuando se indique lo contrario, asumimos que (1)  $I_x$  es finito, (2) el combinador  $\otimes$  es una operación asociativa y conmutativa, y (3)  $\otimes$  tiene un elemento de identidad  $id_{\otimes}$ , de modo que  $r_0(x) = id_{\otimes}$  y este es también el valor predeterminado en caso de que el espacio de iteración esté vacío. Decimos que un PCR básico  $A$  *termina* en la entrada  $x$  si la operación de reducción se ha realizado para todo  $i \in I_x$ . Escribimos  $end_A$  para denotar esta condición. De las definiciones dadas, se sigue que la salida del PCR  $A$  es el valor de  $r$  cuando se cumple  $end_A$ .

**3.2 Sintaxis básica.**- En la Tabla I, presentamos una sintaxis simple para describir PCRs. Para cualquier variable de flujo de productor/consumidor  $v$ ,  $v[i]$  refiere al valor en el índice de iteración actual  $i$  (es decir,  $v^i$ ) y esto se puede escribir más convenientemente como  $v$ . Además, las funciones básicas tienen acceso opcional al índice parámetro  $i$  si necesitan actuar sobre su valor. Aquí no nos detenemos en la sintaxis o semántica del lenguaje anfitrión ya que no asumimos ninguno en particular.

Tipo	Sintaxis	Descripción
Espacio de iteración	$l\mathbf{bnd} A(x)$ $u\mathbf{bnd} A(x)$ $\mathbf{prop} A(i)$	$A$ es el nombre del PCR, y $l\mathbf{bnd}$ , $u\mathbf{bnd}$ y $\mathbf{prop}$ especifican el espacio de iteración.
Productor	$p = \mathbf{produce} f_p x p$	$f_p$ es una función básica y $x$ es la

		variable de entrada del PCR.
Consumidor	$c_k = \text{consume } f_c \ x \ p \ c_1 \ \dots \ c_{k-1}$	$f_c$ es una función básica, $x$ es la variable de entrada del PCR, $p$ es la variable de salida del productor y $c_1, \dots, c_{k-1}$ son las variables de salida de los consumidores previos.
Reductor	$r = \text{reduce } \otimes (r_0 \ x) (f_r \ x \ p \ c_1 \ \dots \ c_k)$	$\otimes$ es el combinador del reductor (con valor inicial $r_0$ ) y $f_r$ es una función básica sobre la entrada del PCR y las salidas del productor y los consumidores.

Tabla I.- Sintaxis PCR.

También es útil tener sintaxis para el manejo explícito de dependencias. En general, para las variables  $v, w$  y los índices  $i, j$ , la instrucción **dep**  $v(i) \rightarrow w(j)$  significa que el valor de  $w$  en  $j$  (es decir,  $w^j$ ) depende del valor de  $v$  en  $i$  (es decir,  $v^i$ ). Para mirar hacia atrás sobre  $v$  en  $k$  (es decir,  $v^{i-k}$ ) la sintaxis es  $v[-k]$ , y para mirar hacia adelante sobre  $v$  en  $k$  (es decir,  $v^{i+k}$ ) la sintaxis es  $v[+k]$ . Ningún valor puede depender de los valores presentes o futuros de la misma variable, ya que esta situación puede introducir *deadlock*. El código de la Figura III captura el ejemplo informal ilustrado en la Figura II, donde el PCR externo es llamado `FibPrimes` y el PCR interno es llamado `IsPrime`. Aquí `IsPrime` es un PCR básico, mientras que `FibPrimes` es un caso de PCR compuesto con otro PCR a través del consumidor.

**3.3 ¿Qué computa un PCR?.-** Aquí centramos nuestra atención en lo que computa un PCR. Nos interesa el comportamiento funcional y para esto buscamos una forma explícita que incluya las funciones básicas que constituyen el PCR. Todas las operaciones PCR, excepto las reducciones, son

```

fun fibs(p,i) = if i <= 2 then 1 else p[-1] + p[-2]
fun count(r,c) = r + if c then 1 else 0
dep p(i-1)  $\rightarrow$  p(i)
dep p(i-2)  $\rightarrow$  p(i)
lbnd FibPrimes(N) = 1
ubnd FibPrimes(N) = N

fun divs(j) = j
fun notDiv(F,d) = not (F % d == 0)
lbnd IsPrime(F) = 2
ubnd IsPrime(F) = floor(sqrt(F))

PCR FibPrimes(N)                PCR IsPrime(F)
  p = produce fibs p                d = produce divs
  c = consume IsPrime p          b = consume notDiv F d
  r = reduce count 0 c           a = reduce and (F > 1) b

```

Figura III.- Solución PCR al problema de contar números Fibonacci primos.

asignaciones de la forma  $v^i := f_v(x, u_1, \dots, u_k, i)$ . Entonces, las variables  $v$  y  $u_j$  son flujos mientras que  $f_v$  es una función en los flujos  $u_j$  (así como en la entrada  $x$  y el índice  $i$ ). Podemos tratar a  $f_v$  también como un flujo si definimos  $\vec{f}_v$  como una versión “currificada” de  $f_v$

$$\vec{f}_v(x, u_1, \dots, u_k) = i \in \mathbb{N} \mapsto f_v(x, u_1, \dots, u_k, i)$$

de manera que  $v^i = \vec{f}_v^i(x, u_1, \dots, u_k)$  para cada  $i$  tal que *wrt*( $v^i$ ). Esto nos permite expresar el efecto de las operaciones PCR como una composición de flujos originada a partir de funciones básicas en un estilo *index-free*. De esta forma, una sola expresión matemática se puede usar para caracterizar funcionalmente una clase abstracta de PCRs sin importar las dependencias particulares entre sus componentes. En particular, para un PCR básico  $A$  con un solo consumidor, si denotamos por  $A(x)$  la salida de  $A$  en la entrada  $x$ , tenemos:

$$A(x) = \otimes_{i \in I_x} \vec{f}_r^i(x, \vec{f}_p(x), \vec{f}_c(x, \vec{f}_p(x)))$$

**4. Formalización del patrón PCR en TLA+.** TLA+ es un lenguaje de especificación desarrollado por Lamport [3] que se ha utilizado con éxito en lugares como Intel, Amazon y Microsoft para especificar y verificar principalmente sistemas concurrentes. Se puede analizar en dos fragmentos: (1) La Lógica Temporal de las Acciones (TLA), una variante de la lógica temporal original de Pnueli que hace práctico escribir una especificación como una sola fórmula, y (2) una teoría de primer orden basada en la teoría de conjuntos de Zermelo-Fraenkel con el axioma de elección (ZFC) y un operador de elección.

En el marco de TLA+, la computación se entiende como la evolución discreta del estado descrito por una fórmula lógica temporal, donde el estado está formado por estructuras lógicas descritas en las matemáticas basadas en la teoría de conjuntos. En TLA+, tanto el sistema como sus propiedades son fórmulas en la misma lógica. En consecuencia, un sistema  $S$  satisface la propiedad  $P$  si y solo si  $S \Rightarrow P$  es una fórmula válida de la lógica. Además, el sistema  $S_2$  es un refinamiento del sistema  $S_1$  si y solo si  $S_2 \Rightarrow S_1$  es una fórmula válida de la lógica.

TLA+ posee un buen soporte de herramientas, una característica necesaria para el uso industrial. En particular, admite la verificación automatizada (en modelos finitos) mediante *model-checking* con la herramienta TLC [4] y la verificación semiautomática mediante la demostración de teoremas con la herramienta TLAPS [5]. Además, existe un IDE que está muy bien integrado con las herramientas y generalmente se considera como la forma preferida de trabajar con TLA+ [6]. Ahora presentamos una formalización en TLA+ de los modelos PCR abstractos y las funciones que computan. Hay principalmente dos temas a tratar:

1. **La semántica entrada-salida.** El comportamiento de entrada-salida de un PCR se identificó previamente con ciertas funciones bajo algunos supuestos algebraicos. Para tratar esto formalmente, organizamos los conceptos matemáticos requeridos, las propiedades y pruebas a través de una colección de módulos TLA+ donde solo se usan matemáticas clásicas.
2. **La semántica concurrente.** Se proporciona una semántica concurrente formal para PCR usando el fragmento temporal de TLA+. Para tal fin, llevamos a cabo una traducción directa de las operaciones de PCR como acciones en el sentido de TLA+ para que una ejecución de PCR pueda verse como un sistema de transiciones etiquetado (y justo).

Estos dos puntos están conectados en TLA+ por las nociones de corrección parcial (una propiedad de *safety*) y terminación (una propiedad de *liveness*). Juntas, nos aseguran que la semántica concurrente debe calcular una función apropiada en caso de terminación.

Además, las especificaciones de diferentes modelos de PCR están conectadas por la noción de refinamiento bajo sustituciones apropiadas. Las especificaciones están parametrizadas para las

funciones básicas y otros elementos concretos que debe proporcionar el usuario en circunstancias normales. De esta manera, las clases de PCR concretos se pueden representar con una única especificación, de modo que instanciar los parámetros de la especificación resulta en un PCR concreto particular.

**4.1 Supuestos iniciales.-** Fijamos algunos supuestos básicos sobre los PCRs y su ejecución. Estas suposiciones se hacen principalmente en aras de la simplicidad, pero algunas de ellas también se deben a limitaciones en el soporte de herramientas.

Asumimos una semántica de ejecución por *interleaving*, que es el enfoque más común adoptado para modelar la concurrencia y una abstracción razonable para la mayoría de los propósitos prácticos.

De acuerdo con las definiciones dadas en la Sección 3, las funciones básicas pueden leer todas las variables anteriores. Una simplificación que hacemos es leer solo de la variable inmediatamente anterior. No hay pérdida de expresividad, ya que cada función básica podría reenviar los valores anteriores junto con su salida si fuera necesario. Además, solo consideramos PCRs de un solo consumidor. Nuevamente, no hay pérdida de expresividad, ya que podemos expresar el cómputo de múltiples consumidores con uno solo.

Para favorecer la uniformidad en nuestras especificaciones, nunca asumimos que el PCR principal que se especifica se encuentra en la raíz de la jerarquía de ejecución. En general, los índices son secuencias de números naturales, formalmente objetos de la forma  $I \circ \langle i \rangle \in Seq(Nat)$  (que informalmente escribimos como  $I, i$ ) donde  $I$  es el índice de la instancia (también el índice de la instancia del padre) e  $i$  es la asignación actual en el PCR interior. Entonces, el punto de vista que adoptamos es que el PCR principal que se especifica opera a partir de algún índice base  $I_0 \in Seq(Nat)$ , que puede ser el índice vacío  $\langle \rangle$  (en cuyo caso podría considerarse como la raíz de ejecución), pero de lo contrario significaría que se ubica más profundo en la jerarquía de ejecución, lo que refleja una configuración un poco más general.

**4.2 Formalización de la semántica entrada-salida.-** El resultado de un PCR básico  $A$  en la entrada  $x$  está dado (asumiendo que termina) por la expresión  $\bigotimes_{i \in I_x} \vec{f}_A$  para alguna función  $\vec{f}_A: \mathbb{N} \rightarrow D$  construida a partir de las funciones básicas del PCR y suponiendo que  $(D, id_{\otimes}, \otimes)$  es un monoide abeliano. Aquí necesitamos una definición formal adecuada para este tipo de expresiones en el lenguaje TLA+, que también debería ser manejable por sus herramientas. Para ello formalizamos la extensión de una operación binaria  $\otimes$  a intervalos finitos (no necesariamente consecutivos) de  $\mathbb{N}$  bajo ciertas propiedades algebraicas. Actualmente, la biblioteca estándar de matemáticas que ofrece TLAPS no es muy grande. Sin embargo, hay material suficiente para nuestras necesidades. Nuestra formalización es completamente independiente del concepto PCR y está organizada en varios módulos. Algunos se resumen en la Tabla II.

Módulo	Descripción
AbstractAlgebra	Definiciones de álgebra abstracta elemental.
MonoidBigOp	Operación general sobre una estructura monoide.
AbelianMonoidBigOp	Operación general sobre una estructura monoide abeliana.

Tabla III.- Módulos de la especificación TLA+ para conceptos algebraicos y sus teoremas asociados.

**4.3 Formalización de los modelos abstractos de PCR.-** La Tabla III resume algunos de los módulos TLA+ que representan los modelos abstractos de PCR. Cada módulo incluye la semántica entrada-salida correspondiente y la semántica concurrente. A continuación, explicamos brevemente el PCR básico. Los demás módulos pueden considerarse extensiones o variaciones.

Módulo	Descripción	Instancia concreta
PCR_A	PCR básico.	FibPrimes1, IsPrime
PCR_A_c_B	PCR compuesto a través del consumidor con un PCR básico.	FibPrimes2
PCR_DC	PCR que implementa la estrategia <i>divide-and-conquer</i> .	MergeSort, NQueens

Tabla IIII.- Módulos de la especificación TLA+ para los modelos PCR abstractos e instancias concretas.

Elementos como funciones básicas, tipos y dependencias de datos se parametrizan mediante símbolos constantes. En particular,  $Dep_{pp}$ ,  $Dep_{pc}$  y  $Dep_{cr}$  son pares de conjuntos *look-ahead/look-behind* de la forma  $\{\{b_1, b_2, \dots\}, \{a_1, a_2, \dots\}\}$ . El estado de un PCR básico está representado por las siguientes variables: (1)  $X$ : La entrada del PCR, una función (parcial) de índices al tipo de entrada  $T$ . (2)  $p$ : La variable de salida del productor, una función mapeando índices a funciones parciales de  $Nat$  al tipo del productor  $T_p$ . (3)  $c$ : La variable de salida del consumidor, una función mapeando índices a funciones parciales de  $Nat$  al tipo del consumidor  $T_c$ . (4)  $r$ : La variable de salida del reductor, una función de índices al tipo de salida  $D$ . (5)  $red$ : Una variable auxiliar para registrar las reducciones hechas en cualquier momento, una función que mapea índices a funciones de  $Nat$  a  $BOOLEAN$ . Las variables  $p$ ,  $c$  y  $red$  representan el comportamiento interno del PCR, mientras que las variables  $X$  y  $r$  representan el comportamiento visible externo. Otro PCR puede querer escribir en la entrada  $X$  o leer en la salida  $r$ . Por conveniencia, las variables internas son funciones “currificadas” que separan el índice padre  $I \in Seq(Nat)$  de la asignación  $i \in Nat$ . En notación TLA+, a todas estas variables se accede con corchetes (múltiples) ya que son funciones (de funciones). Para variables internas tenemos, por ejemplo, que  $p[I]$  denota el flujo productor en el índice  $I$  mientras que  $p[I][i]$  denota el valor de la  $i$ -ésima asignación del flujo productor en el índice  $I$ . En lo que sigue, a veces escribimos en la notación de superíndice como era habitual en la Sección 3, por ejemplo,  $p^I$  y  $p^{I,i}$  respectivamente. La especificación de la semántica entrada-salida proporciona una fórmula que caracteriza la función matemática asociada al PCR básico. Esta fórmula se usa para afirmar la corrección y también se puede usar para representar el PCR como un cómputo de un solo paso. El módulo `AbelianMonoidBigOp` se instancia con la firma  $(D, id_{\otimes}, \otimes)$  y el supuesto  $H\_Algebra$  afirma que satisface las leyes de un monoide abeliano, lo que nos da acceso a los teoremas correspondientes para poder hacer demostraciones deductivas. Para PCRs concretos esta hipótesis debe verificarse.

$$M \triangleq \text{INSTANCE } AbelianMonoidBigOp$$

$$\text{AXIOM } H\_Algebra \triangleq AbelianMonoid(D, id_{\otimes}, \otimes)$$

La especificación de la semántica concurrente proporciona una fórmula temporal en la llamada forma canónica, una conjunción de fórmulas de *safety* y *liveness*. Una especificación no justa de línea de base principal, denominada *Spec* como de costumbre, y su versión justa (con condiciones de *fairness*) se definen de acuerdo con la forma canónica

$$Spec \triangleq Init \wedge \square [Next]_{vs}$$

$$FairSpec \triangleq Spec \wedge WF_{vs}(Step)$$

donde  $vs = \langle X, p, c, r, red \rangle$ . Las condiciones iniciales las establece el predicado de estado *Init*. La salida del reductor es inicialmente por defecto la identidad del monoide  $id_{\otimes}$ . Las salidas de productor y consumidor son inicialmente indefinidas, y el historial de reducción es inicialmente

falso. La acción *Next* gobierna la evolución del estado y es la disyunción de dos sub-acciones posibles y mutuamente excluyentes *Step* y *Done*. La acción *Done* detecta la terminación cuando todas las instancias bien definidas del PCR (dadas por el conjunto *WDIndex*) han terminado y el estado del sistema no cambia, esto es

$$Done \triangleq (\forall I \in WDIndex : end(I)) \wedge vs' = vs$$

La acción *Step* representa cualquier operación posible de los componentes básicos del PCR. Para esto, las operaciones son modeladas por acciones atómicas: *P* para el productor, *C* para el consumidor y *R* para el reductor, las cuales están parametrizadas por el índice de instancia *I* y la asignación actual *i*. Por lo tanto, *Step* se define como un (doble) cuantificador existencial que introduce no determinismo para modelar la ejecución concurrente de posibles instancias múltiples del PCR básico y las acciones de sus componentes:

$$Step \triangleq \exists I \in WDIndex : \exists i \in It(X^I) : P(I, i) \vee C(I, i) \vee R(I, i)$$

La corrección parcial y la terminación se formulan de la siguiente manera:

$$Correctness \triangleq \Box (end(I_0) \Rightarrow r^{I_0} = A(X^{I_0}))$$

$$Termination \triangleq \Diamond end(I_0)$$

**4.4 Verificación de propiedades.** - Cada módulo tiene una sección que establece las propiedades de *safety* y *liveness* asociadas al PCR especificado en dicho módulo y, posiblemente, también propiedades de refinamiento relacionadas con PCRs especificados en otros módulos. Aquí, las propiedades de *safety* incluyen la corrección parcial del PCR y otras propiedades invariantes como la corrección del tipo, mientras que las propiedades de *liveness* son, más específicamente, la propiedad de terminación. En el marco de TLA+, la verificación mecánica se puede realizar de las siguientes maneras:

- **Model-checking con TLC.** Los parámetros de símbolos constantes deben instanciarse con definiciones concretas que puedan evaluarse, lo que da como resultado PCRs concretos. Esto significa que el *model-checking* se puede utilizar como método de verificación para PCRs concretos sobre tipos de datos finitos. TLC permite verificar propiedades de *safety*, *liveness* y refinamientos.
- **Demostración deductiva con TLAPS.** Para el enfoque deductivo no necesitamos instanciar parámetros de símbolos constantes. Esto significa que la verificación se puede realizar para el modelo de PCR abstracto sin restricciones de finitud. TLAPS actualmente permite verificar las propiedades de *safety* y el componente de *safety* en las propiedades de refinamiento (es decir, sin las condiciones de *fairness*).

## 5. Conclusión. -

En trabajos futuros, esperamos poder extender nuestro trabajo en otras direcciones. En particular, sabemos que en las próximas versiones de TLAPS será posible tratar formalmente la terminación que es una propiedad de *liveness*. Además, visualizamos una herramienta de traducción automática para PCR con el mismo espíritu de PlusCal, un lenguaje algorítmico que se traduce a TLA+ [7]. Actualmente hay trabajos que están investigando la extracción de código ejecutable desde PlusCal, creemos que esto podría beneficiarnos y, por lo tanto, no es poco realista apuntar a programas PCR ejecutables y correctos. En resumen, creemos que esta tesis contribuye al estado del arte en el refinamiento formal de programas paralelos a partir de modelos abstractos, especialmente partiendo de una caracterización alternativa del patrón general de PCR, y utilizando el marco teórico y práctico que ofrece TLA+. Esperamos haber mostrado esto como una interesante línea de investigación dentro de la búsqueda general de la programación de calidad.

## 6. Referencias. -

- [1] Asanovic, K. et al; *A view of the parallel computing landscape*, Commun. ACM, 2009. 52(10) : p. 56–67.
- [2] Pérez, G. y Yovine, S.; *Formal specification and implementation of an automated pattern-based parallel-code generation framework*, STTT, 2017. 21(2) : p. 183–202.
- [3] Lamport, L.; *Specifying Systems: The TLA+ Language and Tools for Hardware and Software Engineers*, 2002, Addison-Wesley Longman Publishing.
- [4] Yu, Y. et al; *Model Checking TLA+ Specifications*, Correct Hardware Design and Verification Methods, 1999. 1703 : p. 54–66.
- [5] Cousineau, D. et al.; *TLA+ Proofs*, FM 2012: Formal Methods, 2012. 7436 : p. 147–154.
- [6] Kuppe, M. et al; *The TLA+ Toolbox*, ArXiv, 2019. p. 50–62.
- [7] Lamport, L.; *The pluscal algorithm language*, Theoretical Aspects of Computing-ICTAC, 2009. 5684 : p. 36–60.

### Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

JES ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.



# In defense of extreme database-centric architecture

*En defensa de una arquitectura extrema centrada en la base de datos*

*Em defesa de uma arquitetura extrema centrada em banco de dados*

Alfonso Vicente<sup>1</sup>

Recibido: 28/05/2023

Aceptado: 28/05/2023

**Summary.** - A famous aphorism in computer science goes: "All problems in computer science can be solved by another level of indirection", often expanded by the humorous clause "except for the problem of too many levels of indirection". After 30 years of applying the first aphorism, multi-tier architectures (i.e. architectures with many levels of indirection) have become the de facto standard for web applications, leaving little room for alternative architectures. But in the industry, there is a product to develop and run web applications that follows a different architecture, centered on the RDBMS to the extreme of not needing any other component to function. There are not many papers in academia that addresses RDBMS-centric architectures in general, and this extreme architecture in particular has not been considered. In recent works I have analyzed the case of an extreme database-centric architecture, which I have called RDBMS-only architecture. This article defends the relevance and analyzes opportunity cases of this approach.

**Keywords:** RDBMS, Web Application Architecture, Database-Centric Architectures.

**Resumen.** - *Un aforismo famoso en ciencias de la computación dice: "Todos los problemas en ciencias de la computación pueden resolverse con otro nivel de indirección", a menudo ampliado con la cláusula humorística "excepto por el problema de tener demasiados niveles de indirección". Después de 30 años de aplicar el primer aforismo, las arquitecturas de varios niveles (es decir, arquitecturas con muchos niveles de indirección) se han convertido en el estándar de facto para las aplicaciones web, dejando poco espacio para arquitecturas alternativas. Pero en la industria existe un producto para desarrollar y ejecutar aplicaciones web que sigue una arquitectura diferente, centrada en el RDBMS al extremo de no necesitar ningún otro componente para funcionar. No hay muchos artículos académicos que aborden las arquitecturas centradas en RDBMS en general, y esta arquitectura extrema en particular no se ha considerado. En trabajos recientes he analizado el caso de una arquitectura extrema centrada en bases de datos, a la que he llamado arquitectura RDBMS-only. Este artículo defiende la pertinencia y analiza casos de oportunidad de este enfoque.*

**Palabras clave:** RDBMS, Arquitectura de aplicaciones Web, Arquitecturas centradas en la Base de Datos.

---

<sup>1</sup> Magíster en Informática. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UDELAR), Uruguay, avicente@fing.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3575-5326>

**Resumo.** - Um famoso aforismo em ciência da computação diz: "Todos os problemas em ciência da computação podem ser resolvidos por outro nível de indireção", frequentemente expandido pela cláusula humorística "exceto pelo problema de muitos níveis de indireção". Após 30 anos aplicando o primeiro aforismo, as arquiteturas multicamadas (ou seja, arquiteturas com muitos níveis de indireção) tornaram-se o padrão de fato para aplicativos da Web, deixando pouco espaço para arquiteturas alternativas. Mas na indústria existe um produto para desenvolver e rodar aplicações web que segue uma arquitetura diferenciada, centrada no RDBMS ao extremo de não precisar de nenhum outro componente para funcionar. Não há muitos artigos acadêmicos que abordam arquiteturas centradas em RDBMS em geral, e essa arquitetura extrema em particular não foi considerada. Em trabalhos recentes, analisei o caso de uma arquitetura extrema centrada em banco de dados, que chamei de arquitetura RDBMS-only. Este artigo defende a relevância e analisa casos de oportunidade dessa abordagem.

**Palavras-chave:** RDBMS, arquitetura de aplicativos da Web, arquiteturas centradas em banco de dados.

**1. Introduction.** -This article defends the hypothesis that a web application architecture physically contained in a Relational Database Management System (RDBMS), which has been called an RDBMS-only architecture, is a valid alternative, with advantages and disadvantages compared to the well-established multi-tier architectures.

It is important to clarify that this hypothesis is not inconsistent with the well-established theory that argues that multi-tier architectures constitute *an* adequate conceptual framework for the design of web applications, since they provide many important advantages. However, the hypothesis would be inconsistent with a theory that argues that multi-tier architectures are *the only* suitable conceptual framework for web application design, leaving no room for alternative architectures. Although this latter theory has not been explicitly affirmed, it has sometimes been implicitly assumed, and the little available literature that presents alternatives will also be discussed.

Furthermore, as this work summarizes previous publications, an article [1] and a master's thesis [2], its focus is to defend the relevance of the approach and analyze the opportunity to use it in certain use cases. It might appear that defending an argument implies bias. However, I believe this is not the case. From an empirical and historical point of view, multi-tier architectures have come to be seen as the only viable alternative. A whole generation of software engineers has been trained according to this idea, and there is almost no dissenting literature.

This article attempts to put the "extreme" database-centric architecture on an equal footing with the "extreme" middleware-centric architecture. The advantages of the latter have been extensively analyzed, but the advantages of the former have not.

Sections 2 and 3 provide a theoretical framework for understanding the validity of a database-centric architecture from conceptual and historical perspectives, respectively. Section 4 briefly presents the extreme database-centric (or RDBMS-only) architecture. Section 5 argues in defense of this architecture, explaining its advantages and the best possible cases of application. Finally, section 6 presents some conclusions and reflections.

**2. Web application architectures from a conceptual point of view.** - This section will discuss the relationship between layers, understood as portions of code with well-defined responsibilities, and tiers, understood as physical and/or technological components of an information system.

At a conceptual level, information systems are typically designed with three layers: 1) the *presentation layer*, 2) the application logic layer or *business logic layer*, and 3) the resource management layer or *data access layer*. The presentation layer is responsible for managing the display and collecting information from and to the end-user, usually through a Graphical User Interface (GUI). The business logic layer handles the processing related to the specific business application, while the data access layer executes database functions such as retrieval, addition, deletion, and modification of records [3].

In real systems, these conceptual layers can be combined and distributed across separate tiers, often involving different servers and specialized technologies. Many modern web applications employ a three-tier architecture, commonly known as 1) the client-tier, 2) the middle-tier, and 3) the data-tier. In most cases, there is a one-to-one correspondence between layers and tiers. Specifically, the business logic layer typically aligns with the middle-tier, which is positioned "in the middle" between the client and data tiers, constituting a physical middle-tier. This situation explains why the terms "business logic layer," "middle layer," and "middle tier" are sometimes used

interchangeably, and there are even specialized technologies referred to as "middleware". However, it is important to understand that the business logic layer is not necessarily limited to residing in the middle-tier.

How can the layers be distributed across tiers? Since layers are simply code components with specific responsibilities, it could be argued that the question is poorly formulated because the code comprising a single layer could be distributed across multiple tiers. However, for the purpose of modeling the problem, it is simplified by assuming that a layer is atomic.

Modern web applications must be accessible through web browsers without the need for plugins, a concept known as thin client. In other words, the majority of the code for the three layers must be distributed across two tiers: the middle-tier and the data-tier. According to the loft principle, at least two layers should coincide in a single tier. However, it is also possible for all three layers to coincide in one tier.

There are several theoretical approaches to analyzing the possible alternatives for organizing the architecture of an application in tiers. One of these approaches is Koppelaars' classification, which categorizes the eight theoretical combinations of three-tier systems, considering both a thin version ("little code") and a fat version ("lots of code") for each tier [4]. It's worth noting that in practice, there are only seven relevant combinations, as the thin/thin/thin case holds no genuine interest. A thin/fat/thin architecture (or Thick Middleware) implies that the code is predominantly in the middle-tier, whereas a thin/thin/fat architecture (or Thick Database) means that the code primarily resides in the data-tier<sup>2</sup>.

According to Koppelaars' classification, the majority of modern web applications have a thin/fat/thin architecture (or Thick Middleware). However, Middleware is not the only tier that can be enriched with business logic. Web applications require thin clients, but the use of a thick middleware tier, while common, is neither necessary nor universal. There is an alternative approach to locate complex business logic: the data-tier. In this case, as Koppelaars points out, a thin/thin/fat combination is theoretically possible and, in some cases, may be advantageous. He refers to this case as the database-centric architecture. The terms database-backed, RDBMS-backed, database-centric, and database-driven are typically used interchangeably to describe web architectures where the RDBMS plays a vital role. In database-backed websites, content is dynamically generated by querying the database, and there is no application server [5].

Another way to interpret this classification is as the possible distributions of the layers across levels. Thus, a common distribution aligns each layer with a tier (presentation layer in the client-tier, business logic layer in the middle-tier, and data access layer in the data-tier). Using the notation: P for the presentation layer, BL for the business logic layer, and DA for the data access layer, this architecture can be denoted as the ordered triad (P, BL, DA), where the order corresponds to the client, middle, and data tiers. Following this nomenclature, and adopting the idea of using "thin" when there is little code, two possible distributions of a thin/fat/fat architecture could be (thin, P+BL, DA) and (thin, P, BL+DA). It is also common for the "lots of code" that implement the presentation, business logic, and data access layers to all be situated in the middle-tier (thin, P+BL+DA, thin). Conversely, although less frequent, it is also possible for the "lots of

---

<sup>2</sup>This classification, however, does not make it clear how the "lots of code" of each layer would be distributed in the middle and data tiers of a thin/fat/fat architecture. For this reason, an alternative that allows these distinctions to be made is presented below.

code" to be located in the data-tier, encompassing the presentation, business logic, and data access layers (thin, thin, P+BL+DA), as presented graphically in Figure I.

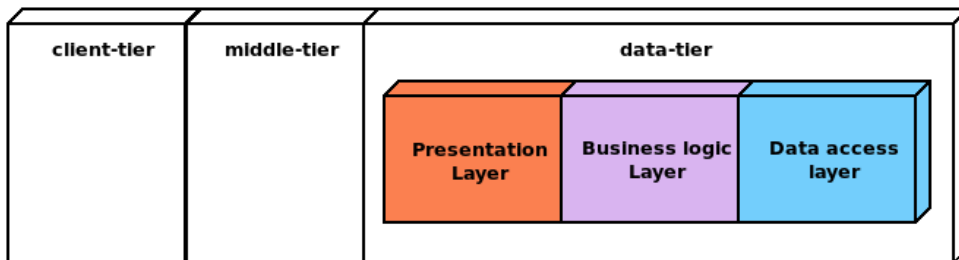


Figure I. A database-centric architecture

Thickening the data tier with presentation and especially with business logic code, could be possible when the RDBMS implements a Database Programming Language (DBPL). This architecture is feasible whether it is referred to as thin/thin/fat, (thin,thin,P+BL+DA), database-centric, or Thick Database. However, couldn't this database-centric architecture be more extreme? Without the need for middleware, the thin/zero/fat combination is possible. This alternative will be addressed in Section 4, following the historical discussion in Section 3.

**3. Web application architectures from a historical point of view.** - The decade of the nineties was marked by the advent of the Web, which made its debut in 1991. Tim Berners-Lee's invention had three fundamental components: URLs, which enabled access to the entire Web in a "flat" manner; the stateless HTTP protocol, which standardized communication; and the HTML language, which simplified the creation of web pages. This era also witnessed the development of graphical browsers such as Mosaic and Netscape. Netscape, in particular, introduced features like Secure Sockets Layer (SSL) for secure information transmission and cookies for tracking user information [6].

From the early days, there was a recognized need for creating database-backed websites, where content could be generated dynamically from information stored in a database. In 1993, the industry proposed a solution called the Common Gateway Interface protocol (CGI), which outlined how web servers could interact with external programs known as CGI scripts, and how these scripts could return dynamic pages to the web server [7].

Although it was technically feasible to develop a "web listener" that would allow the entire application to be implemented in a Database Programming Language (DBPL) as shown in Figure II, this approach was not pursued at the time due to the lack of mature DBPLs. Instead, Object-Oriented Programming (OOP) gained popularity during this period [8]. Object-Oriented Database Management Systems (OODBMS) were not widely adopted by the industry and did not reach maturity [9]. As a result, most web application architectures followed a typical pattern of having an object-oriented middle-tier and a relational data-tier.

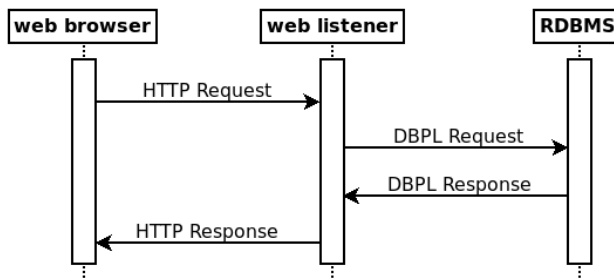


Figure II. The web listener of an RDBMS as a protocol adapter

This introduced a challenge: persisting objects in a relational format was not straightforward due to the object-relational impedance mismatch. To overcome this challenge, a dedicated component called Object-Relational Mapping (ORM) was introduced. These components have evolved over time to simplify data access and hide much of the complexity. In this scenario, the Thick Middleware architecture, where the middle-tier contains the bulk of the code, became the norm for web applications.

Oracle, in contrast to the prevailing trend, historically embraced a database-centric architecture with its products Forms and Application Express (APEX), leveraging its DBPL called PL/SQL [10, 11]. However, the feasibility of this approach does not depend on any particularity of the Oracle RDBMS; any RDBMS implementing a DBPL can serve as the foundation for an RDBMS-only architecture. This notion has been demonstrated in other works [1, 2].

APEX, which follows an extreme database-centric architecture, exemplifies the thin/zero/fat combination, or what I refer to as the RDBMS-only architecture, where an entire application resides within the RDBMS. In fact, even the web server can be contained within the RDBMS using the Embedded PL/SQL Gateway (EPG). Alternatively, the web listener component can be deployed as an Apache module or a Java application. Regardless of the deployment method, the focus of the architecture remains exclusively on the RDBMS. When Oracle describes the APEX architecture as "simple," it pertains to the physical view. However, it is important to note that while the physical view of the RDBMS-only architecture simplifies by consolidating all the complexity into a single component, it introduces increased logical complexity within that component, which raises design considerations.

An interesting historical question arises: why did Oracle choose to pursue a path that seemingly contradicted the prevailing trend, and why did others not follow suit? While definitive answers to these questions may be elusive, several hypotheses can be considered: a) the evolution of APEX was largely unplanned, and b) the APEX architecture went unnoticed by academia and the industry.

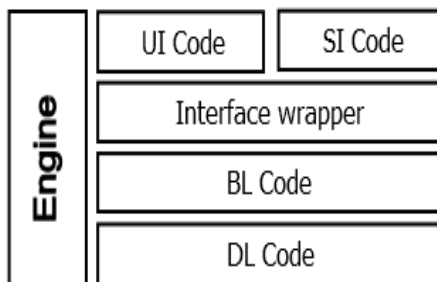
The first hypothesis can be justified by recognizing that APEX did not originate as a purpose-built solution for its current objectives. Instead, its conception was incremental. From the outset, the Oracle RDBMS was designed to handle HTTP requests, which laid the groundwork for the architecture, at least in practice. However, initial expectations regarding the capabilities of this technology were modest, limited to the potential use for developing reports and replacing spreadsheets. It was only over time and through experimentation that APEX's capabilities expanded to enable the development of stateful applications and the provision of an Integrated

Development Environment (IDE) built on the same technology. The evolution of APEX can be seen as a spontaneous order—an outcome of human action but not human design. In retrospect, the decision made by APEX architects proved to be fruitful, providing Oracle's clients with an alternative to building enterprise web applications without the need for additional technologies.

To justify the second hypothesis, it is helpful to distinguish between two types of novelty: true novelty, which entails genuinely new ideas, and novelty of arrangements, where the novelty arises from the combination of existing ideas. In this context, APEX represents a novelty of arrangements by combining preexisting capabilities of a DBPL within an RDBMS with the use of HTTP as a communication protocol. While this form of novelty of arrangements is indeed novel in practice, it does not rely on any published original idea. Additionally, compacting an entire enterprise application into a single physical tier appears to contradict the current trend of multi-tier separation, service-oriented architectures, and decoupled components running on containerized platforms. Furthermore, Oracle has not made any efforts to publish specific details about the APEX architecture at an academic level, limiting its description to aspects relevant to application administrators, developers, and its technical circles. Consequently, due to its status as a novelty of arrangements, its divergence from prevailing trends, and Oracle's limited interest in conducting and publishing research papers on the subject, it is understandable why the APEX architecture has gone unnoticed by academia and the wider industry.

**4. The extreme database-centric architecture.** - This section presents the proposed extreme database-centric architecture, which can be seen as a simple shift in emphasis from multi-tier architectures. Instead, a multi-layered architecture is proposed, but with these layers being logical layers within an RDBMS. The simplification is physical and technological, but the complexity does not disappear and is evident in the development and process views of the architecture [2].

Figure III illustrates the logical view of the architecture. On the right side are the layers of user applications. Each layer's code is only allowed to interact with objects and invoke code residing in the immediate lower layer. The Data Logic (DL), Business Logic (BL), and User Interface (UI) Code layers follow the Koppelaars classification. However, a new Service Interface (SI) Code layer is introduced at the same level as the UI Code layer. Additionally, the Interface Wrapper layer aims to separate the input and output of data from the specificities of both the graphical interface and web services. On the left side is an "engine" that does not adhere to the layered architecture of user applications. The engine is responsible, among other things, for executing the application flow. The innermost layer is not depicted in Figure III, as it represents the layer of the RDBMS itself, where database objects such as tables and indexes are located, and where the specific SQL dialect of the RDBMS executes SELECT, INSERT, UPDATE, and DELETE statements.



*Figure III. Logical view of the extreme database-centric architecture*

The DL Code layer encompasses stored procedures and/or functions that allow the use of SQL statements. This layer provides an interface to the upper layer for manipulating database relations as if they were an Abstract Data Type (ADT). It is worth noting that this layer can be automatically generated and kept synchronized with the database schema, and a catalog of existing functions can be maintained for use by the outer layer. It could also provide a standard RDBMS-independent interface if a standard DBPL existed. The absence of such a language at present does not imply that it cannot be developed in the future.

The BL Code layer represents the domain logic, which utilizes the functionalities provided by the previous layer. This is the most complex layer responsible for implementing use cases and ensuring transactional design. This layer can be further subdivided according to specific needs, either into more internal and external layers or into segments for cross-cutting functionalities. The interface of this layer to the outside provides high-level operations in a procedural format with RDBMS-specific data types.

In the Interface Wrapper layer, high-level operations are consumed and offered back to the upper layers, but with inputs and outputs in a standard format independent of both the RDBMS data types and the interface itself, such as Extensible Markup Language (XML) or JavaScript Object Notation (JSON).

Finally, the UI Code and SI Code layers include two different output formatting options: one designed for end clients through a web browser, and the other designed for web services. It is important to note that in this context, "interface" does not solely refer to graphical interface elements. This allows the treatment of domain layer functionalities in a symmetrical manner, whether it is a human user requiring an HTML interface or another system invoking a web service. As long as there are no interface elements in any of the underlying layers, maintaining the interface in these layers should be easier since it is confined to these layers. It should be noted that the architecture is a theoretical proposal, and variants may make sense depending on implementation decisions. For example, if it is decided to use PostgreSQL as the RDBMS and adopt a product like PostgREST to simplify the automatic provision of a REST API from the stored procedures of the BL Code layer, the Interface Wrapper layer could be eliminated.

In this analysis, the discussion of the specificities of the engine and the Integrated Development Environment (IDE) is beyond the scope of this document. However, perhaps I should mention one aspect of the interface design that Koppelaars and the APEX designers seem to have arrived at independently: the conception of a GUI as a network of pages, where each page contains a hierarchy of interface elements and navigation rules to other pages that are triggered by certain events. An essential element of this navigation is that the status of each session must be maintained in the database.

**5. Defense of the extreme database-centric architecture.** - In another work, I conducted a systematic comparison between two technologies using two versions of the same application. One version was implemented using the RDBMS-only architecture, while the other version utilized a middleware, with the ISO 25010 standard serving as the framework [2].

In this section, I aim to defend the extreme database-centric architecture itself, rather than advocating for a particular technology. I will identify the theoretical advantages it offers over a multi-tier architecture. Although this focus on advantages does not imply that the approach is without disadvantages, the software engineering community will readily and fully identify the



latter.

The most apparent savings can be observed in terms of technology. The RDBMS is the only required component, eliminating the need for a middleware technology. This can result in savings in computing and communication time in many cases, regardless of whether it leads to savings in licenses. Moreover, this technological simplicity reduces the number of components, thereby minimizing potential points of failure or vulnerability. These technology savings subsequently translate into process and personnel savings.

Process savings manifest in various forms, as multiple processes must be performed within each component of a solution. By reducing the number of components, there are fewer elements to monitor, update, back up, recover in the event of an incident, or integrate into configuration and change management processes. Many routine and exceptional processes are simplified by confining them to a single technology type.

Personnel savings primarily involve reducing the requirement for specific skills. Some companies or departments may possess individuals with advanced database skills but lack expertise in middleware technologies. In such cases, a database-centric approach can serve as an enabler. In the event of an incident, for instance, there is no need to determine the involved components initially. The troubleshooting process remains consistent, starting with the analysis of stored procedures and proceeding to the analysis of other stored procedures and eventually SQL statements.

However, it is important to note that this architecture may not be suitable for every case. For example, I am not suggesting its use for e-commerce sites with high write concurrency. Nonetheless, many systems do not have such demanding write concurrency requirements. Additionally, most RDBMSs offer relatively simple and transparent solutions to achieve high read scalability.

Therefore, the database-centric architecture could be applied in scenarios such as ticketing systems in small and medium-sized companies, in-house applications, or systems with low write but high read activity, like documentation systems or web logs. Furthermore, it can be an excellent alternative for converting desktop applications to web applications, especially when the existing architecture is already database-centric, and the business logic layer is implemented using a DBPL within the RDBMS.

Investing in the implementation of business logic in the DBPL of an RDBMS also proves to be a favorable option when presentation and middleware technologies are expected to change more frequently in the long term compared to RDBMS technologies. Moreover, the technological simplicity offered by this approach has the potential to reduce IT operating costs.

**6. Conclusions.** - The APEX case could represent an anomaly for following an architecture that does not meet expectations about how a web application *should* be structured. Those expectations are usually tacit, arising from continuous exposure to papers, textbooks and technologies that propose, describe and follow very different architectures.

When the web was invented, object orientation already existed. After the first experiences with technologies such as CGI, objects were a dominant trend in web applications, and along with objects at least three-tier architectures and middleware. These trends could be seen as a true

paradigm in the sense of Kuhn's scientific paradigm<sup>3</sup>, where a new paradigm replaces the previous one [12]. The limitations of CGI could have been seen as evidence of a crisis of the "structured programming paradigm", and in that sense the new "object-oriented paradigm" was not simply an alternative but an overcoming. These ideas, explicitly or implicitly, may have dominated in both the academic and industry communities, and may perhaps explain the scarcity of works focused on database-centric architectures, and the uniqueness of APEX as an extreme database-centric architecture.

As far as I know, no one has postulated the following historical conjectures: 1) the trend of using object-oriented middleware was historically conditioned (I don't say determined) by the difference in maturity between OOP and DBPLs, 2) that trend was never explicitly challenged theoretically, even as DBPLs matured into a reasonable alternative, 3) Oracle's development of APEX was largely unplanned and is little known outside the APEX specialist community, and 4) no one has cautioned that APEX represents in practice a theoretically valid alternative.

While it is understandable historically why the alternative of an extreme database-centric architecture was not considered, conceptually it is a valid alternative, and there is at least one product in the industry that provides at least a glimpse of its possibilities. Moreover, there is no reason to think that Oracle has exploited all the possibilities of the architecture, or that the internal design of its product is the best possible.

In my master thesis I hope to have demonstrated that the development of a technology such as APEX does not depend on any particularity of the Oracle RDBMS. With any RDBMS that has a mature DBPL it is possible to build a similar technology, and the architecture of web applications developed with such technology have a number of inherent advantages that make them attractive for some use cases.

If I am correct in the aforementioned, it would be more appropriate to consider the extreme database-centric architecture not as a paradigm superseded in the sense of Kuhn, but rather as an underexplored yet progressive research programme in the sense of Lakatos<sup>4</sup> [13].

It would be reasonable to invest efforts in this alternative research programme to ascertain whether the theoretical development of the programme precedes empirical development that could yield numerous benefits. This is the main reason why, in this scenario, a defense seemed timely.

---

<sup>3</sup>Many have quoted Kuhn applying his idea of paradigms to technology, without realizing that Kuhn was referring to science. The guiding principle of technology is not truth, but utility, and for a "technical paradigm" to replace another, the latter should constitute an overcoming according to all possible criteria. To what extent one can speak of "technical paradigms" and what scope they might have, is a work that, I believe, remains to be done.

<sup>4</sup>Again, it should be noted that Lakatos speaks of scientific (and not technological) research programmes. It is far from obvious what, *mutatis mutandi*, can be preserved by moving from the realm of science to the realm of technology. In any case, I think the idea I am trying to convey is clear: if in the realm of science where (generally) truth is considered the guiding principle, it is reasonable to work in parallel on alternative research programmes, how much more reasonable should it be to do the same in the realm of technology where the main guiding principle is utility?

## 1. References

- [1] Vicente, A., Etcheverry, L. and Sabiguero, A; An RDBMS-only architecture for web applications, *2021 XLVII Latin American Computing Conference (CLEI)*. IEEE, 2021.
- [2] Vicente, A; La arquitectura RDBMS-only: una arquitectura database-centric para aplicaciones Web, Tesis de maestría. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería, 2021. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31620>
- [3] Scourias, J; Aspects of client/server database systems, University of Waterloo, 1995.
- [4] Koppelaars, T; A Database-Centric Approach to J2EE Application Development, Oracle Development Tools Users Group (ODTUG), 2004.
- [5] Greenspun, P; Database Backed Web Sites: The Thinking Person's Guide to Web Publishing. Ziff-Davis Publishing Co., 1997.
- [6] Ceruzzi, P; Computing: a concise history, MIT press, 2012.
- [7] T. A. S. Foundation; Rfc 3875 - the common gateway interface (cgi) version 1.1, 2004. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc3875>
- [8] Nielsen, J; Noncommand user interfaces, *Communications of the ACM*, vol. 36, no. 4, pp. 83–99, 1993.
- [9] Kim, W; Object-Oriented Database Systems: Promises, Reality, and Future, in *VLDB*, vol. 19, 1993, pp. 676–692
- [10] Cimolini, P; Oracle Application Express by Design: Managing Cost, Schedule, and Quality. Apress, 2017.
- [11] Llewellyn, B; NoPlsql versus ThickDB, 2016. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20170909164923/https://blogs.oracle.com/plsql-and-ibr/noplsq-versus-thickdb>
- [12] Kuhn, T; *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago press, 2012.
- [13] Lakatos, I; Falsification and the methodology of scientific research programmes, in Lakatos I. and Musgrave A. *Criticism and the growth of knowledge*, Cambridge University Press, 1970
- [14] Lakatos, I; History of science and its rational reconstructions, *PSA: Proceedings of the biennial meeting of the philosophy of science association*. Vol. 1970. D. Reidel Publishing, 1970.

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

AV ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

# A Model-Driven Analysis of Miblewimble Security Properties and its Protocol Implementations

*Un Análisis Basado en Modelos de las Propiedades de Seguridad de Miblewimble y las Implementaciones del Protocolo*

*Uma Análise Orientada a Modelo das Propriedades de Segurança do Miblewimble e suas Implementações de Protocolo*

Adrián Silveira <sup>1</sup>, Gustavo Betarte <sup>2</sup>, Maximiliano Cristiá <sup>3</sup>, Carlos Luna <sup>4</sup>

Recibido: 29/05/2023

Aceptado: 29/05/2023

**Summary.** - Miblewimble is a privacy-oriented cryptocurrency technology that provides security and scalability properties that distinguish it from other protocols. Miblewimble's cryptographic approach is based on Elliptic Curve Cryptography which allows verifying a transaction without revealing any information about the transactional amount or the parties involved. Miblewimble combines Confidential transactions, CoinJoin, and cut-through to achieve a higher level of privacy, security, and scalability. In this work, we present and discuss these security properties and outline the basis of a model-driven verification approach to address the certification of the correctness of the protocol implementations. In particular, we propose an idealized model that is key in the described verification process. Then, we identify and precisely state the conditions for our model to ensure the verification of relevant security properties of Miblewimble. In addition, we analyze the Grin and Beam implementations of Miblewimble in their current state of development. We present detailed connections between our model and their implementations regarding the Miblewimble structure and its security properties.

**Keywords:** security; formal verification; miblewimble; idealized model; cryptocurrency.

**Resumen.** - Miblewimble es una criptomoneda orientada a la privacidad con propiedades de seguridad y escalabilidad que la distingue de otras criptomonedas. Miblewimble está basado en Criptografía de Curvas Elípticas lo que permite verificar la validez de las transacciones sin revelar información alguna sobre el monto y las partes involucradas. Miblewimble combina transacciones confidenciales y las técnicas de CoinJoin y cut-through para alcanzar mayor nivel de privacidad, seguridad y escalabilidad. En este trabajo, presentamos y discutimos estas

---

<sup>1</sup> Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, adrians@fing.edu.uy  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8742-046X>

<sup>2</sup> Profesor Titular, Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, gustun@fing.edu.uy,  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6863-1082>

<sup>3</sup> Profesor, CIFASIS y Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina, cristia@cifasis-conicet.gov.ar,  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9163-2609>

<sup>4</sup> Profesor Agregado, Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, cluna@fing.edu.uy,  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9985-5927>

*propiedades de seguridad y describimos un enfoque basado en la verificación de modelos para alcanzar la certificación de la corrección de las implementaciones del protocolo. En particular, proponemos un modelo idealizado que es clave en el proceso de verificación descrito. Luego, identificamos y describimos precisamente las condiciones que nuestro modelo debe cumplir para asegurar las verificaciones de propiedades de seguridad relevantes de Mumblewimble. Además, analizamos el estado actual de sus dos más importantes implementaciones, Grin y Beam. Finalmente, presentamos conexiones detalladas entre nuestro modelo y las implementaciones en relación con la estructura de Mumblewimble y sus propiedades de seguridad.*

**Palabras clave:** seguridad; verificación formal; mumblewimble; modelo idealizado; criptomoneda.

**Resumo.** - Mumblewimble é uma tecnologia de criptomoeda orientada para a privacidade que fornece propriedades de segurança e escalabilidade que a distinguem de outros protocolos. A abordagem criptográfica do Mumblewimble é baseada na Elliptic Curve Cryptography, que permite verificar uma transação sem revelar nenhuma informação sobre o valor da transação ou as partes envolvidas. O Mumblewimble combina transações confidenciais, CoinJoin e cut-through para alcançar um nível mais alto de privacidade, segurança e escalabilidade. Neste trabalho, apresentamos e discutimos essas propriedades de segurança e delineamos a base de uma abordagem de verificação orientada por modelo para abordar a certificação da correção das implementações de protocolo. Em particular, propomos um modelo idealizado que é chave no processo de verificação descrito. Em seguida, identificamos e declaramos com precisão as condições de nosso modelo para garantir a verificação das propriedades de segurança relevantes do Mumblewimble. Além disso, analisamos as implementações Grin e Beam do Mumblewimble em seu estado atual de desenvolvimento. Apresentamos conexões detalhadas entre nosso modelo e suas implementações em relação à estrutura Mumblewimble e suas propriedades de segurança.

**Palavras-chave:** segurança; verificação formal; mumblewimble; modelo idealizado; criptomoeda.

**1. Introduction.** - A cryptocurrency is a digital currency that can be exchanged online for goods and services. It can be converted into cash through a cryptocurrency exchange and vice versa. Many cryptocurrencies work using a technology called blockchain, a distributed ledger of transactions that is duplicated and distributed across the nodes of a computer network. A defining feature of cryptocurrencies is that there is no central trusted authority. The ledger is maintained using a consensus-based validation protocol where transactions are constructed in a peer-to-peer fashion and broadcast to the entire set of participants who work to validate them and build blocks. Therefore, the consensus algorithm is what decides which is the following block to be appended to the blockchain. This decentralized mechanism is devised to achieve reliability in a network consisting of unreliable nodes. In what follows, we present relevant security aspects of cryptocurrencies and discuss the importance of applying formal methods to verify their implementations.

**1.1 Cryptocurrency Security.** - Cryptocurrency protocols are a valuable target for several attacks since they deal with virtual money. Irreparable losses of money and credibility have been caused because of several attacks against cryptocurrency systems [3]. Security and confidentiality are now much more important in this situation. For this reason, the cryptocurrency community is looking for techniques and approaches that can reduce the likelihood of successful attacks. One such approach is the application of formal methods to software implementation. In particular, interest in formally certified implementations and formal proofs has increased [14].

Mimblewimble (MW) is a privacy-oriented cryptocurrency technology with scalability and security that set it apart from similar technologies. In MW, unlike Bitcoin, there is no such concept as an address, and all the transactions are confidential. The method used in this work is based on formal software verification, and it aims to formally verify the fundamental mechanisms of MW and its implementations [7, 6]. Security issues are explored on an idealized model of the MW protocol. Such model delivers a realistic environment while abstracting away the specifics of any particular implementation. Then, verification should be performed on more detailed models, where low-level mechanisms are specified. Finally, it must be proved that the low-level model implements the idealized model.

**1.2 Related Work and Contributions.** - The cryptocurrency community is interested in applying formal methods to guarantee correctness and properties over their protocol constructions. For instance, Idelberger et al. [8] proposes the use of defeasible logic frameworks such as Formal Contract Logic for the description of smart contracts. However, the authors did not analyze the necessary conditions the cryptocurrency protocols should satisfy to guarantee security properties. Boyd et al. presented a blockchain model in Tamarin [2], which is useful for analyzing certain blockchain based protocols.

We believe that cryptocurrency protocols should undergo a formal security assessment in order to prove and guarantee security properties from a formal point of view. A complete formal model of the cryptocurrency is crucial. For instance, Ruffing et al. [15] show an attack against Zerocoin [12] exposing the lack of an important missing property in the formal security analysis of the cryptocurrency.

The goal of the present work was to identify and analyze the main components of the MW protocol in order to build an idealized model and verify security properties. The specific objectives were to i) identify and specify the based schemes and protocols of MW, ii) identify and define the main components of our model, iii) define and verify relevant security properties and iv) compare our model with the most popular implementations of MW: Grin and Beam.

The proposed idealized model constitutes the main contribution together with the analysis of the essential properties it is shown to verify. This idealized model constitutes the basis of a model-driven verification approach to address the certification of the correctness of the protocol's implementation. Furthermore, this model will enable the analysis of several attacks to prove their existence or absence over the model.

This work is organized as follows. Section 2 provides a brief description of MW. Section 3 defines the schemes and protocols our model is based on. Section 4 describes the building blocks of a formal idealized model of MW. Section 5 analyzes protocol and security properties over the model. Then, Section 6 analyzes the Grin and Beam implementations of MW in their current state of development. Final remarks and directions for future work are presented in Section 7.

**2. The Mumblewimble protocol.** - In August 2016, someone called "Tom Elvis Jedusor" (the french name for Voldemort in Harry Potter) posted a text file on the IRC Channel describing a cryptocurrency protocol with a different approach from BitCoin. This article titled 'Mumblewimble' [9] addressed some privacy concerns and the ability to compress the transaction history of the chain without losing validity verification. In October 2016, since this document left some questions open, Andrew Poelstra published a paper [13] where he described, in more detail, the design of a blockchain based on MW.

Next, we describe how money transfer is carried out on the MW protocol. Suppose Alice and Bob agree on a money transfer. Alice wants to send  $v$  coins to Bob. They communicate off-chain and create the MW transaction, including the transaction amount  $v$ .

Then, the transaction should be added to a block which is distributed across the nodes of a computer network to be added to the blockchain.

In MW, transactions are Confidential transactions [11]. A transaction allows a sender (Alice) to encrypt the amount  $v$  of bitcoins by using blinding factors. Only the two parties involved know the amount of bitcoins being exchanged in a confidential transaction. However, for anyone observing the transaction, it is possible to verify its validity by comparing the number of inputs and outputs; if both are the same, the transaction will be considered valid. Such procedure ensures that no money has been created from nothing and is key in preserving the system's integrity. In MW transactions, the recipient (Bob) randomly selects a range of blinding factors provided by the sender, which are then used as proof of ownership by the receiver.

**3. Schemes and Protocols.** - A commitment scheme is a cryptographic primitive that allows a player in a protocol to choose a value and commit to his choice such that he can no longer change his mind. The value is kept hidden from others with the ability to reveal the committed value later. In MW transactions, the transaction amounts and blinding factors are hidden in Pedersen commitments. We say that it is hard (in terms of complexity) for someone observing the transaction to know the transaction amount or the blinding factor. In addition, since the transaction amounts are hidden, it should be possible to verify that the values are positive without revealing any information about them. Range proofs should be provided to guarantee the transactional amount lies in some range. Moreover, a transaction contains a signature to guarantee it was honestly constructed. Next, we define the schemes and protocols our model is based on.

**3.1 Commitment Scheme.** - A commitment scheme [5] is a two-phase cryptographic protocol between two parties: a sender and a receiver. At the end of the commit phase, the sender is committed to a specific value that he cannot change later, and the receiver should have no information about the committed value. A non-interactive commitment scheme [4] can be defined as follows:



**Definition 1 (Non-interactive Commitment Scheme)** A non-interactive commitment scheme  $\zeta(Setup, Com)$  consists of two probabilistic polynomial time algorithms, *Setup* and *Com*, such that:

- *Setup* generates public parameters for the scheme depending on the security parameter  $\lambda$ .
- *Com* is the commitment algorithm:  $Com : M \times R \rightarrow C$ , where  $M$  is the message space,  $R$  the randomness space and  $C$  the commitment space. For a message  $m \in M$ , the algorithm draws uniformly at random  $r \leftarrow R$  and computes the commitment  $com \leftarrow Com(m, r)$ .

We have simplified the notation, but it is essential to remember that *Com*,  $M$ ,  $R$ , and  $C$  depend on the parameters generated by *Setup*.

We say the commitment algorithm is a linear function if:

$$\forall m_1, m_2 \in M, r_1, r_2 \in R: Com(m_1, r_1) + Com(m_2, r_2) = Com(m_1 + m_2, r_1 + r_2)$$

In other words, *Com* is additive in both parameters.

Transactions in MW are derived from Confidential transactions, which are enabled by Pedersen commitments with homomorphic properties over elliptic curves. We define the non-interactive Pedersen commitment scheme we will use in our model, based on *Definition 1*, as follows:

**Definition 2 (Pedersen Commitment Scheme with Elliptic Curves)** Let  $M$  and  $R$  be the finite field  $F_n$  and let  $C$  be the set of points determined by an elliptic curve  $C$  of prime order  $n$ . As in *Definition 1*, the probabilistic polynomial time algorithms are defined as:

- *Setup* generates the order  $n$  (dependent on the security parameter  $\lambda$ ) and two generator points  $G$  and  $H$  on the elliptic curve  $C$  of prime order  $n$  whose discrete logarithms relative to each other are unknown.
- $Com(v, r) = r \cdot G + v \cdot H$ , with  $v$  the transactional value and  $r$  the blinding factor chosen randomly in  $F_n$ .

Each MW transaction contains a list of range proofs of the transactional values. Next, we define the range proof scheme we will analyze in our model.

**3.2 Range Proof Scheme.** - Range proofs aim at proving that a secret value is in a particular range without revealing the value. Transactions in MW contain a list of range proofs proving that the transactional values are positive and less than a specific upper bound to avoid overflow errors. We define a non-interactive zero-knowledge (NIZK) range proof scheme from a commitment scheme as follows:

**Definition 3 (NIZK Range Proof Scheme)** Let  $\zeta(Setup, Com)$  be a Pedersen commitment scheme as in *Definition 2*. Let  $P$  be the range proof space for the values  $v \in M$  such that  $v$  lies in some range  $[a, b]$ . A non-interactive zero-knowledge range proof scheme  $\eta(Prove, Verify)$  consists of two probabilistic polynomial time algorithms, *Prove* and *Verify*, such that:

- *Prove* :  $M \times R \times C \rightarrow P$ , which receives a value  $v$ , the random value  $r$  and the commitment  $c = Com(v, r)$  and computes the range proof for the value  $v$ .
- *Verify* :  $C \times P \rightarrow bool$ , that given a commitment value and a range proof, decides if the value is in the range.

Notice that the Prove algorithm computes a zero-knowledge proof to the commitment to verify that the committed value is in a particular range. In other words, the guarantee enables a prover to convince a verifier that the statement holds without revealing any information about the secret value. In addition, since the transactional values should be positive, the amount should lie in  $[0, b]$  such that  $b$  is large enough to guarantee privacy concerns.

**3.3 Schnorr Signature Protocol.** –The construction of the MW transaction is made off-chain by the parties. For simplicity, we shall work with a signature protocol between two parties, but this can be generalized to multi-parties.

During the transaction construction Alice needs to verify Bob’s Schnorr signature. Schnorr signature protocols can be applied over any group where discrete logarithm is hard, in our case, over an elliptic curve  $C$ . Next, we define the Schnorr signature protocol used by them during the transaction construction. The message  $m$  can be the empty string.

**Definition 4 (Schnorr Signature Protocol)** Let  $C$  be an elliptic curve of prime order  $n$  with generator  $G$ . Let  $hash : \{0,1\}^* \rightarrow F_n$  be a cryptographic hash function over the finite field  $F_n$ . Alice secretly knows  $k_A \in F_n$  whose public key is  $K_A = k_A \cdot G$

**Signing**

The following steps are followed to create a signature on a message  $m \in \{0,1\}^*$ :

1. Alice chooses nonce  $n_A \leftarrow \$ F_n$  where  $\leftarrow \$$  denotes that  $n_A$  is drawn uniformly at random from  $F_n$ .
2. She computes public key  $N_A = n_A \cdot G$
3. She computes  $e = hash(N_A | K_A | m)$  and  $s_A = n_A + e \cdot k_A$  where  $|$  denotes concatenation and  $N_A, K_A$  are represented as a bit string.
4. The signature  $\sigma$  is defined as follows:

$$\sigma = (s_A, N_A), \text{ with public key } K_A$$

**Validation**

A signature  $\sigma = (s_A, N_A)$  is valid if the following holds:

$$s_A \cdot G = N_A + e \cdot K_A$$

Each MW transaction contains a signature  $\sigma$  made by the parties during the transaction construction, which can be seen as a Schnorr multi-signature.

Next, a Schnorr signature protocol aggregation is defined according to our model.

**Definition 5 (Schnorr Signature Protocol Aggregation)** Let  $C$  be an elliptic curve of prime order  $n$  with generator  $G$ . Let  $hash: \{0,1\}^* \rightarrow F_n$  be a cryptographic hash function over the finite field  $F_n$ . Alice and Bob secretly know  $k_A, k_B \in F_n$  whose public keys are  $K_A = k_A \cdot G$  and  $K_B = k_B \cdot G$  respectively.

**Signing**

The following steps are followed to create a multisignature on a message  $m \in \{0,1\}^*$ :

1. Alice and Bob choose nonces  $n_A, n_B \leftarrow \$ F_n$  respectively
2. They compute public keys  $N_A = n_A \cdot G$  and  $N_B = n_B \cdot G$

3. They compute  $e = \text{hash}(N_A + N_B | K_A + K_B | m)$  and respectively compute:

$$s_A = n_A + e.k_A \quad s_B = n_B + e.k_B$$

4. The aggregate signature  $\sigma$  is defined as follows:

$$\sigma = (s_a + s_B, N_A + N_B)$$

with the aggregate public key  $K_A + K_B$

**Validation**

A signature  $\sigma = (s_a + s_B, N_A + N_B)$  is valid if the following holds:

$$(s_A + s_B).G = N_A + N_B + e.(K_A + K_B) \tag{1}$$

Next, we show that a signature  $\sigma$  honestly constructed will be valid.

If we consider the signing process, we know that:

$$s_A = n_A + e.k_A \text{ and } s_B = n_B + e.k_B$$

By applying algebraic properties on elliptic curves, the left term on the equality 1 can be written as:

$$(s_A + s_B).G = (n_A + e.k_A).G + (n_B + e.k_B).G = n_A.G + e.k_A.G + n_B.G + e.k_B.G = n_A.G + n_B.G + e.(k_A.G + k_B.G)$$

So, if we substitute the left term on the equality 1, we have:

$$n_A.G + n_B.G + e.(k_A.G + k_B.G) = N_A + N_B + e.(K_A + K_B)$$

The above equality holds because:

$$N_A = n_A.G, K_A = k_A.G \text{ and } N_B = n_B.G, K_B = k_B.G$$

$(N_A, K_A)$  are Alice’s public keys, and  $(N_B, K_B)$  are Bob’s public keys. Since we are working over the elliptic curve  $C$  where the discrete logarithm is hard, the only ones who know the private keys  $(n_A, k_A)$  and  $(n_B, k_B)$  are Alice and Bob respectively.

**4. Idealized Model.** - The essential elements of our model are transactions, blocks, and chains. Each node in the blockchain maintains a local state. The main components are the local copy of the chain and the set of transactions waiting to be validated and added to a new block. Moreover, each node keeps track of unspent transaction outputs (UTXOs). Next, we define all the elements which compose our idealized model.

**4.1 Transactions.** - Given two fixed generator points  $G$  and  $H$  on the elliptic curve  $C$  of prime order  $n$  (whose discrete logarithms relative to each other are unknown), we define a single transaction as follows:

**Definition 6 (Transaction)** A single transaction  $t$  is a tuple of type:

$$\text{Transaction} \stackrel{\text{def}}{=} \{i : I^*, o : O^*, tk : \text{TxKernel}, tko : \text{KOffset}\}$$

with  $X^*$  representing the lists of elements of type  $X$  and where:

- $i = [c_1, \dots, c_n]$  and  $o = [o_1, \dots, o_m]$  are the lists of inputs and outputs. Each input  $c_i$  and output  $o_i$  are points over the curve  $C$  and they are the result of computing the Pedersen

commitment  $r.G + v.H$  with  $r$  the blinding factor and  $v$  the transactional value in the finite field  $F_n$ .

- $tk = \{rp, ke, \sigma\}$  is the transaction kernel where:
  - $rp = [rp_1, \dots, rp_m]$  is a list of range proofs of the outputs. The  $j$  th item  $rp_j$  in  $rp$  corresponds to the  $j$  th item  $o_j$  in  $o$
  - $ke$  is the transaction excess represented by  $(\sum_1^m r' - \sum_1^n r - tko).G$
  - $\sigma$  is the kernel Schnorr signature (for simplicity, fees are left aside)
- $tko \in F_n$  is the transaction kernel offset.

Inputs are previous transaction outputs. The transaction kernel offset will be used to construct a block to satisfy security properties.

The ownership of a coin is given by the following definition:

**Definition 7 (Ownership)** Given a transaction  $t$ , we say  $S$  owns the output  $o$  if  $S$  knows the opening  $(r, v)$  for the Pedersen commitment  $o = r.G + v.H$ .

The strength of this security definition is directly related to the difficulty of solving the logarithm problem. If the elliptic curve discrete logarithm problem in  $C$  is hard, then given a multiple  $Q$  of  $G$ , it is computationally infeasible to find an integer  $r$  such that  $Q = r.G$ .

It is essential to notice that the sender and the receiver do not learn their respective blinding factors during the construction of the transaction. Instead, they build a Schnorr signature that is used to guarantee the authenticity of the transaction's excess value.

We say that a transaction is valid if the following property holds:

**Property 1 (Valid Transaction)** A transaction  $t$  is valid (valid transaction( $t$ )) if  $t$  satisfies:

- i. The range proofs of all the outputs are valid.
- ii. The transaction is balanced.
- iii. The kernel signature  $\sigma$  is valid for the excess.

These three properties have a straightforward formalization in our model.

The first property we should guarantee is that all the range proofs of all the outputs are valid.

**Definition 8 (Valid Range Proof Outputs Transaction)** Let  $t = \{i, o, tk, tko\}$  be a transaction as in *Definition 6*, with transaction kernel  $tk = \{rp, ke, \sigma\}$  where  $o = [o_1, \dots, o_m]$  is the list of outputs and  $rp = [rp_1, \dots, rp_m]$  is the list of the range proof outputs. Let  $\eta(Prove, Verify)$  be a NIZK scheme as in *Definition 3* with  $P$  the range proof space where  $rp_j \in P$  proves that  $o_j$  lies in the range  $[0, 2^n]$  where  $n$  is small enough to not cause overflow errors. We say all the range proof output transactions are valid if: for all  $rp_j \in rp, Verify(o_j, rp_j) = true$ .

The list of range proof outputs provides proof that each transactional output is positive without revealing further information.

The second property is defined as follows:

**Definition 9 (Balanced Transaction)** A transaction  $t = \{i, o, tk, tko\}$ , with transaction kernel  $tk = \{rp, ke, \sigma\}$ , is balanced if the following holds:

$$\sum_{o_j \in o} o_j - \sum_{c_j \in i} c_j = ke + tko.G$$

A balanced transaction guarantees no money is created from thin air.

The kernel signature  $\sigma$  is a Schnorr signature aggregation with the kernel excess  $ke$  as the public key.

Note that, for simplicity during the transaction construction, in *Definition 5* we consider a Schnorr signature aggregation between two parties; however, once the transaction is constructed, it is not

necessary to know the parties involved.

**Definition 10 (Valid Signature for the kernel excess)** Let  $t = \{i, o, tk, tko\}$  be a transaction as in *Definition 6* with transaction kernel  $tk = \{rp, ke, \sigma\}$  where:

- $rp$  is a list of range proofs of the outputs.
- $ke$  is the transaction excess.
- $\sigma = (s, N)$  is the kernel Schnorr signature aggregation as in *Definition 5* on the empty string  $m$ .

We say the kernel signature  $\sigma$  is valid with public key  $ke$  if the following holds:

$s \cdot G = N + e \cdot ke$  such that  $e = \text{hash}(N \parallel ke)$

**4.2 Aggregate Transactions.** - A single transaction can be seen as the sending of money between multiple parties. An aggregate transaction represents many transactions.

**Definition 11 (Aggregate Transaction)** An aggregate transaction  $tx$  is a tuple of type:

$$TransacAgg \stackrel{\text{def}}{=} \{i : I^*, o : O^*, tks : TxKernel^*, tko : KOffset\}$$

Transactions can be merged non-interactively to construct an aggregate transaction. This process can be applied recursively to add more transactions into one aggregate transaction. The CoinJoin mechanism [10] makes it possible. It combines all inputs and outputs from separate transactions to form a single transaction, and the signatures can be composed by the parties. A Transaction Join can be understood as a simple way to perform CoinJoin with no composite signatures.

**Definition 12 (Transaction Join)** Given a valid transaction  $t_0$  and an aggregate transaction  $tx$ :

$$t_0 = \{i_0, o_0, tk_0, tko_0\} \text{ and } tx = \{i, o, tks, tko\}$$

a new aggregate transaction can be constructed as:

$$tx = \{i_0 \parallel i, o_0 \parallel o, tk_0 \parallel tks, tko_0 + tko\}$$

The validity of the transactional parties guarantees the validity of an aggregate transaction during the construction process.

**Lemma 1 (Invariant: CoinJoin Validity)** Let  $t_0$  be a valid transaction and  $tx$  be a valid aggregate transaction. Let  $tx'$  be the result of aggregating  $t_0$  into  $tx$  as in *Definition 12*. Then,  $tx'$  is valid.

**4.3 Unconfirmed Transaction Pool.** - The unconfirmed transaction pool (*mempool*) contains the transactions which have not been confirmed in a block yet.

**Definition 13 (Mempool)** A mempool  $mp$  is a list of type:

$$Mempool \stackrel{\text{def}}{=} \text{AggregateTransaction}^*$$

**4.4 Blocks and chain.** - The genesis block *Gen* is a particular block since it is the first block ever recorded in the chain. Transactions can be merged into a block. A block is a significant transaction with aggregated inputs, outputs, and transaction kernels.

**Definition 14 (Block)** A Block  $b$  is either the genesis block  $Gen$ , or a tuple of type:

$$Block \stackrel{\text{def}}{=} \{i : I^*, o : O^*, tks : TxKernel^*, ko : KOffset\}$$

where:

- $i = [c_1, \dots, c_n]$  and  $o = [o_1, \dots, o_m]$  are the lists of inputs and outputs of the transactions.
- $tks = [tk_1, \dots, tk_t]$  is the list of  $t$  transaction kernels.
- $ko \in F_n$  is the block kernel offset which covers all the transactions of the block.

In our model, a chain is defined as a list of blocks.

**Definition 15 (Chain)** A chain is a non-empty list of blocks:

$$Chain \stackrel{\text{def}}{=} Block^*$$

For a chain  $c$  and a valid block  $b$ , we can define a predicate  $validate(c, b)$  representing the fact that is correct to add  $b$  to  $c$ . This relation must verify, for example, that all the inputs in  $b$  are present as outputs in  $c$ ; in other words, they are UTXOs.

**5. Properties.** - Since we deal with virtual money, we should guarantee privacy and security properties on our idealized model. Next, we detail some relevant properties that can be verified in our model.

**5.1 Protocol Properties.** - The property of no coin inflation or zero-sum guarantees that no new funds are produced from thin air in a valid transaction. The property can be stated as follows.

**Lemma 2 (No Coin Inflation)** Let  $t = \{i, o, tk, tko\}$  be a valid transaction with transaction kernel  $tk = \{rp, ke, \sigma\}$ . Then, the transaction excess only contains the blinding factor and the kernel offset.

The proof of this lemma ensures that, since a valid transaction is balanced, the difference between the output values and the input values is zero. It means that no coins are being created or destroyed in the transaction.

The cut-through process is an essential feature of MW. This process aims to erase redundant outputs that are used as inputs within the same block. Let  $C$  be a list of coins that appear as an output in the block  $b$ . If the same coins appear as an input within the block, then  $C$  can be removed from the list of inputs and outputs after applying the cut-through process. The only remaining data are the block headers, transaction kernels and UTXOs. After applying cut-through to a valid block  $b$ , ensuring that the resulting block  $b'$  is still valid is essential. We can say that the validity of a block should be invariant concerning the cut-through process.

**Lemma 3 (Invariant: Cut-through Block Validity)** Let  $b = \{i, o, tks, ko\}$  be a block with  $i$  and  $o$  the list of inputs and outputs,  $tks = [tk_1, \dots, tk_t]$  the list of transaction kernels and  $ko$  the block kernel offset. Let  $b' = \{i', o', tks, ko\}$  be the resulting block after applying the cut-through process to  $b$  where:  $i' = i \setminus (i \cap o)$  and  $o' = o \setminus (i \cap o)$ . Hence, if  $b$  is a valid block, then  $b'$  is valid too.

**5.2 Privacy and Security Properties.** - In blockchain systems, the notion of privacy is crucial: sensitive data should not be revealed over the network. In particular, it is desirable to ensure properties such as confidentiality, anonymity, and unlinkability of transactions. Confidentiality refers to the property of preventing other participants from knowing certain information about the transaction, such as the amounts and addresses of the owners. Anonymity refers to hiding the real

identity of the parties involved in a transaction. In contrast, unlinkability refers to the inability to link different transactions of the same user within the blockchain.

**5.2.1 Security properties of Pedersen commitments.** - In MW transactions, input and output amounts are hidden in Pedersen commitments. We have stated that the Pedersen commitment is expected to satisfy hiding and binding properties. The former implies that the transaction amount of coins remains private for the rest of the network over time. The latter means that senders cannot change their commitments to a different transaction amount. If that were possible, it would mean that an adversary could spend coins that have already been committed to a UTXO, which would allow the creation of coins out of thin air.

We have shown that Pedersen commitments are perfectly hiding and computational binding [16]. In particular, we have proved the latter one.

**5.2.2 Security properties of range proofs.** - The goal of zero-knowledge proofs is to prove that a statement is true without revealing any information beyond the verification of the statement. In MW, we need to ensure that the amount is positive in every transaction so that users cannot create coins. Here, the hard part is to prove that without revealing the amount. In our model, the output amounts are hidden in the form of a Pedersen commitment and the transaction contains a list of range proofs of the outputs to prove that the amount is positive. This verification is performed as the first step of the validation of the transaction (Property 1).

We have stated that the range proof scheme (*Definition 3*) is expected to satisfy the properties of completeness, soundness, and zero-knowledge. Completeness states that if the statement holds for a witness  $v$ , the argument provided by the prover can convince the verifier. Soundness says that if the statement does not hold for a witness  $v$ , the prover cannot convince the verifier about the statement.

Zero-knowledge states that the argument does not leak any information about the witness, except whether the statement is true or false.

In our model, we have shown that a range proof scheme is perfect completeness, computational soundness and perfect zero-knowledge [16].

**5.3 Unlinkability and Untraceability.** - In our model, each node has a pool of unconfirmed transactions in the mempool. These transactions are waiting for the miners to be included in a block. We can distinguish two security properties of the transactions. Untraceability refers to the transactions in the mempool and unlinkability to the transactions in the block.

Untraceability states that for every transaction in the mempool, it is impossible to relate the transaction to the IP address of the node that originated it.

Unlinkability states that given a valid block  $b$ , it is computationally infeasible to know which input cancels which output.

In particular, for the unlinkability property, we have proved that for any valid block  $b$  and for any polynomial probabilistic time adversary  $A$ , the probability of  $A$  in finding a balanced transaction within  $b$  is negligible [16].

**6. Implementations.** - Because of its robust security, privacy and scalability, there are several implementations of Mumblewimble. In 2019, the first two practical implementations were launched: Grin and Beam. Although, there are some design and technical differences in both projects, they implement and extend the core of the MW protocol. Both Grin and Beam implementations address the main features of the MW protocol, namely the properties of confidentiality, anonymity and unlinkability comprised in our work. They transactions are based on confidential transactions.

Each input and output is in the form of a Pedersen commitment. All this data has a straightforward relation to our definition of transaction (*Definition 6*).

CoinJoin, as we have mentioned, combines inputs and outputs from multiple transactions into a single transaction in order to obfuscate them. In Grin, every block is a CoinJoin of all other transactions in the block.

Beam supports cut-through as we described above. In addition, Beam adds a scalable feature to eliminate all intermediate transaction kernels [1] in order to keep the blockchain as compact as possible.

**7. Conclusions and Future Work.** - We have introduced a formal analysis of the MW protocol that is the basis of a model-driven verification approach to address the certification of the correctness of a protocol's implementation. First, we have defined the main components of our idealized model: transactions, blocks and chain. Then, we have provided validity conditions to guarantee the correctness of the blockchain. We have stated precise conditions for a valid transaction and a valid block. Furthermore, we have defined and proved that the validity of a block is invariant with respect to the cut-through process and CoinJoin. We have also identified and precisely stated the conditions for our model to ensure the verification of relevant security properties of MW which is an important contribution of this work. Finally, we have analyzed and compared the Grin and Beam implementations in their current state of development, considering our model and its properties as a reference base.

This work contributes to analyzing the MW protocol's correctness and security properties over an idealized model beyond any particular implementation. Since cryptographic proofs are becoming increasingly error-prone and difficult to check, we plan to carry out a specification of our MW model using an interactive prover to provide automated verification of the model. Security goals and hardness assumptions shall be modeled to verify our stated security properties.



## 8. References

- [1] Beam. Beam description. Comparison with classical MW, 2018. Available online: [https://docs.beam.mw/BEAM\\_Comparison\\_with\\_classical\\_MW.pdf](https://docs.beam.mw/BEAM_Comparison_with_classical_MW.pdf) (accessed on May 29, 2023).
- [2] C. Boyd, K. Gjølsteen, and S. Wu. A Blockchain Model in Tamarin and Formal Analysis of Hash Time Lock Contract. In Bruno Bernardo and Diego Marmosoler, editors, 2nd Workshop on Formal Methods for Blockchains (FMBC 2020), volume 84 of OpenAccess Series in Informatics (OASICs), pages 5:1–5:13, Dagstuhl, Germany, 2020. Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum für Informatik.
- [3] Vitalik Buterin. Critical update re: Dao vulnerability, 2017. Available online: <https://blog.ethereum.org/2016/06/17/critical-update-re-dao-vulnerability> (accessed on May 29, 2023).
- [4] B. Bünz, J. Bootle, D. Boneh, A. Poelstra, P. Wuille, and G. Maxwell. Bulletproofs: Short proofs for confidential transactions and more. In 2018 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), pages 315–334, May 2018.
- [5] Claude Crépeau. Commitment. In Henk C. A. van Tilborg and Sushil Jajodia, editors, Encyclopedia of Cryptography and Security, 2nd Ed, pages 224–227. Springer, 2011.
- [6] Beam Foundation. Beam confidential cryptocurrency, 2020. Available online: <https://beam.mw/> (accessed on May 29, 2023).
- [7] Grin. Introduction to MumbleWimble and Grin, 2016. Available online: <https://github.com/mumblewimble/grin/blob/master/doc/intro.md> (accessed on May 29, 2023).
- [8] F. Idelberger, G. Governatori, R. Riveret, and G. Sartor. Evaluation of logic-based smart contracts for blockchain systems. In J. Alferes, L. Bertossi, G. Governatori, P. Fodor, and D. Roman, editors, Rule Technologies. Research, Tools, and Applications - 10th International Symposium, RuleML 2016, Stony Brook, NY, USA, July 6-9, 2016. Proceedings, volume 9718 of LNCS, pages 167–183. Springer, 2016.
- [9] T. Jedusor. Mumblewimble, 2016. Available online: <https://scalingbitcoin.org/papers/mumblewimble.txt> (accessed on May 29, 2023).
- [10] G. Maxwell. Coinjoin: Bitcoin privacy for the real world, 2013. Available online: <https://bitcointalk.org/index.php?topic=279249.0> (accessed on May 29, 2023).
- [11] G. Maxwell. Confidential transactions write up, 2020. Available online: <https://web.archive.org/web/20200502151159/>, [https://people.xiph.org/~greg/confidential\\_values.txt](https://people.xiph.org/~greg/confidential_values.txt) (accessed on May 29, 2023).
- [12] Ian Miers, Christina Garman, Matthew Green, and Aviel D. Rubin. Zerocoin: Anonymous distributed e-cash from bitcoin. In 2013 IEEE Symposium on Security and Privacy, pages 397–411, 2013.
- [13] A. Poelstra. Mumblewimble, 2016. Available online: <https://download.wpsoftware.net/bitcoin/wizardry/mumblewimble.pdf> (accessed on May 29, 2023).
- [14] Grigore Rosu. Formal Design, Implementation and Verification of Blockchain Languages Using K (Invited Talk). In Bruno Bernardo and Diego Marmosoler, editors, 2nd Workshop on Formal Methods for Blockchains (FMBC 2020), volume 84 of OpenAccess Series in Informatics (OASICs), pages 1:1–1:1, Dagstuhl, Germany, 2020. Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum für Informatik.
- [15] Tim Ruffing, Sri Aravinda Thyagarajan, Viktoria Ronge, and Dominique Schröder. Burning zerocoins for fun and for profit: A cryptographic denial-of-spending attack on the zero coin protocol. Cryptology ePrint Archive, Paper 2018/612, 2018. <https://eprint.iacr.org/2018/612>.

[16] Adrián Silveira, Gustavo Betarte, Maximiliano Cristiá, and Carlos Luna. A formal analysis of the miblewimble cryptocurrency protocol. *Sensors*, 21(17), 2021.

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

AS ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

GB ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MC ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

CL ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

# **Estrés abiótico en clima neotropical influencia la producción de pigmentos, capacidad antioxidante y expresión de desórdenes fisiológicos en manzanas.**

*Abiotic stress in neotropical climate influences pigment production, antioxidant capacity and expression of physiological disorders in apples.*

*Estresse abiótico em clima neotropical influencia produção de pigmentos, capacidade antioxidante e expressão de desordens fisiológicas em maçãs.*

Vivian Severino <sup>1</sup>

Recibido: 30/05/2023

Aceptado: 30/05/2023

**Resumen.** - La manzana producida en clima neotropical, presenta daños asociados a estreses abióticos que reducen la sostenibilidad del cultivo. El desarrollo de nuevas zonas de producción y el cambio climático aumentan el interés por estudiar el comportamiento de la fruta en diferentes condiciones. El presente trabajo tuvo como objetivos: determinar factores limitantes, evaluar respuestas fisiológicas, analizar el potencial de predicción de desórdenes, y evaluar estrategias de manejo de estrés abiótico. Fue registrada una alta variabilidad de condiciones predisponentes y desarrollo de daños, siendo la disponibilidad de agua en el suelo la condición más relacionada con el daño por sol. Los tratamientos redujeron los niveles de daño, y modificaron el potencial de xilema. Las aplicaciones de protectores no redujeron la incidencia del quemado de sol, pero el uso de mallas permitió reducir tanto el quemado como el escaldado sin afectar a los procesos de crecimiento dependientes de la asimilación neta. Las diferencias de potencial hídrico entre las caras del fruto, la concentración de prolina y el índice de espectroradiometría PSRI480 presentan las mejores características predictivas, lo que sugiere centrar la investigación en el balance hídrico del sistema y en los indicadores fisiológicos del estrés osmótico como forma de predecir los daños.

**Palabras clave:** daño de sol; escaldado; Granny Smith; espectroradiometría; potencial hídrico.

**Summary.** - Apples produced in neotropical climates show damage associated with abiotic stresses that reduce the sustainability of the crop. The development of new production areas and climate change increase the interest in studying the behavior of the fruit under different conditions. The objectives of the present work were to determine limiting factors, evaluate physiological responses, analyze the potential for predicting disorders, and evaluate abiotic stress management strategies. A high variability of predisposing conditions and damage development was recorded, with water availability in the soil being the condition most related to sunburn. Treatments reduced

---

<sup>1</sup> Doctorado, Facultad de Agronomía, Universidad de la República (UDELAR), Garzón 780, Montevideo CP 12900, Uruguay; vseverin@fagro.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7343-4737>

*damage levels and modified xylem potential. The applications of protectants did not reduce the incidence of sunburn, but the use of netting reduced both sunburn and scald without affecting net assimilation-dependent growth processes. Differences in water potential between fruit sides, proline concentration and PSRI480 spectroradiometry index presented the best predictive characteristics, suggesting to focus research on system water balance and physiological indicators of osmotic stress as a way to predict damage.*

**Keywords:** Sunburn; sunscald; Granny Smith; spectroradiometry; hydric potential.

**Resumo.** - *Maçãs produzidas em climas neotropicais apresentam danos associados a estresses abióticos que reduzem a sustentabilidade da cultura. O desenvolvimento de novas áreas de produção e as mudanças climáticas aumentam o interesse em estudar o comportamento da fruta em diferentes condições. Os objetivos do presente trabalho foram determinar fatores limitantes, avaliar respostas fisiológicas, analisar o potencial de prever distúrbios e avaliar estratégias de gerenciamento de estresse abiótico. Foi registrada uma alta variabilidade de condições predisponentes e desenvolvimento de danos, sendo a disponibilidade de água no solo a condição mais relacionada à queimadura solar. Os tratamentos reduziram os níveis de danos e modificaram o potencial do xilema. As aplicações de protetores não reduziram a incidência de queimaduras solares, mas o uso de rede reduziu tanto a queimadura solar quanto a escaldadura sem afetar os processos de crescimento dependentes da assimilação líquida. Diferenças no potencial hídrico entre lados da fruta, concentração de prolina e índice de espectrorradiometria PSRI480 apresentaram as melhores características preditivas, sugerindo focar a pesquisa no balanço hídrico do sistema e indicadores fisiológicos de estresse osmótico como forma de prever danos.*

**Palavras-chave:** *Queimadura de sol; queimadura solar; Vovó Smith; espectrorradiometria; potencial hídrico.*

**1. Introducción.** - La fruticultura es un rubro relevante en la producción agropecuaria en el Uruguay, que genera 9 millones de dólares corrientes, empleando 165 trabajadores y 32.953 jornales cada 1000 ha (índices elaborados con base en MGAP-DIEA (1). A pesar de su importancia social y económica, la producción nacional de frutas y hortalizas es el 50 % de la necesaria para satisfacer el consumo recomendado para la población (2) y el rubro no es ajeno al proceso de falta de sostenibilidad de las producciones intensivas del sur del Uruguay (3). Habiéndose registrado una reducción del 41 % del número de productores entre 2005 y 2016, la mayoría de ellos menores a 10 ha (2).

La manzana es el tercer rubro de exportación frutícola de Uruguay y es la especie de mayor importancia dentro de la fruticultura de hoja caduca (4), con calidad reconocida en el mercado internacional (5, 6) por sus características organolépticas (7), aunque han sido citados problemas de calidad asociados a la falta de sobrecoloración y el desarrollo de algunos desórdenes fisiológicos como ser: daños de sol, lenticelosis y bitter pit (8, 9).

La calidad de la fruta es un rasgo complejo que se encuentra vinculado a las condiciones de crecimiento del fruto y, por tanto, determina la adaptación ecofisiológica de un cultivo. Los problemas de calidad asociados a estreses abióticos (desórdenes fisiológicos) están presentes en todas las zonas productoras y solo en referencia a los daños por sol se han reportado pérdidas que van desde el 10 al 50 % de la producción (10, 11).

La capacidad de adaptación del manzano, a través del desarrollo de estrategias morfológicas, bioquímicas y moleculares que generan mecanismos de evitación y tolerancia (12) permiten el cultivo incluso en climas tropicales (13). El clima de la región del estudio es clasificado como templado cálido o neotropical (14) presentando factores que se consideran limitantes para la adaptación del cultivo como falta de frío invernal, ocurrencia de heladas, exceso de agua en el suelo, sequía, granizo y daño por sol son (15); situaciones que podrían incrementarse debido a un aumento muy generalizado de la variabilidad (16).

El conocimiento de factores de pre cosecha como exposición excesiva a la luz solar, la alta temperatura (17) y estrés hídrico en los tejidos del fruto (18; 19), que pueden determinar trastornos fisiológicos que condicionen el almacenamiento es importante en la obtención de fruta de calidad (20).

El abordaje más tradicional de los desórdenes fisiológicos de la piel de manzana está centrado en que frutos con excesiva exposición a la radiación solar y altas temperaturas, experimentan condiciones de estrés fotooxidativo e incrementos en la temperatura de su superficie (21, 22, 23). También se ha reportado la expresión de desórdenes fisiológicos inducidos por condiciones de estrés hídrico en los tejidos del fruto y vinculados a los equilibrios nutricionales (24, 25). La detección visual del daño y la comprensión de las condiciones ambientales que se dan en el momento o inmediatamente antes de los síntomas visuales no revelan necesariamente el factor o factores subyacentes que inician los procesos metabólicos o degenerativos que conducen al daño (17).

Con el objetivo de reducir los daños por desórdenes fisiológicos, han sido propuestos manejos del microclima en lo referente a los factores cantidad y calidad de luz, temperatura y estatus hídrico. Entre los más estudiados y utilizados en forma comercial se encuentran: la colocación de mallas sombra, el riego evaporativo, el uso de protectores solares y el manejo del vigor de los árboles (26, 27). La ubicación del cultivo y la orientación de las filas afectan la incidencia de luz sobre él, por lo que deben tenerse en cuenta al momento de la plantación. No obstante, en general son otros los

aspectos jerarquizados para la toma de estas decisiones.

Aplicaciones de ácido ascórbico, tocoferoles y ABA han sido probadas con variada efectividad y altos costos (28). Otro manejo que reduce el quemado de sol es el embolsado individual de la fruta, manejo que puede justificarse en casos de variedades como Fuji, destinadas a mercados de muy alto precio, debido a su mayor costo de producción (29).

Cuando la aparición de desórdenes no puede ser manejada, se deben detectar y eliminar los frutos dañados previo al almacenaje (30). El uso de espectroradiometría ha sido planteado como promisorio para la predicción de desórdenes fisiológicos en campo y en poscosecha (31, 30, 23). Otra herramienta de diagnóstico propuesta en trabajos que relacionan el daño por sol debido a la radiación solar y temperatura excesivas, así como con los déficits hídricos, es la fluorescencia de la clorofila (17). Más recientemente, se ha propuesto el uso de imágenes hiperespectrales, aunque su desarrollo es aún incipiente (32).

El presente trabajo aborda la adaptación del cultivo del manzano centrada en los problemas de calidad de fruta vinculados a factores abióticos, siendo el primer estudio realizado en condiciones de clima neotropical.

## 2. Principales características del ensayo y resultados.

**2.1 Características del ensayo.** - El ensayo fue conducido durante los ciclos de cultivo 2012-2013 a 2015-2016 (en adelante ciclos 1 a 4), en una plantación de manzana ubicada en el departamento de San José, al sur de Uruguay (34°38'18'' S; 56°40'06'' W), implantada en 2003 con dirección N-S y un marco de plantación de 4 m x 1,5 m para el cultivar Granny Smith/M7, y 4 m x 1 m para los cultivares Brasil Gala y Cripps Pink. El cultivo cuenta con riego por goteo con una cinta de riego por fila y góteros distanciados a 1 m, con una capacidad máxima de riego diaria de 4,5 mm.

Los tratamientos realizados sobre la plantación de Granny Smith consistieron en la colocación de mallas y aplicación de protectores solares. Las mallas utilizadas fueron en todos los casos mallas monofilamento con las siguientes características: malla blanca translúcida 20% (MB); malla negra 35% (MN35); malla negra 50% (MN50). Los protectores solares (PRO) fueron caolina (Surround WP®, 50 K/ha) y CaCO<sub>3</sub> (Purshade®, 30 l/ha), aplicados en 4 y 5 ocasiones para las temporadas 1 y 2, respectivamente. Todos los tratamientos se instalaron en cada temporada a mediados del mes de diciembre, entre la semana 6 y 9 después de plena floración (SDPF) y se mantuvieron hasta la cosecha. Los tratamientos de protectores fueron reiterados cada vez que fue necesario, en función de las precipitaciones (luego de la acumulación de 10 mm) y/o el nivel de cubrimiento de los frutos. Las mallas fueron evaluadas durante las 4 temporadas mientras que los protectores solares fueron aplicados en las temporadas 1 y 2.

El diseño experimental a campo fue bloques completos al azar con 3 repeticiones por tratamiento. Las parcelas bajo malla fueron de una superficie de 600m<sup>2</sup> (12 x 50 m) cubriendo fila y entrefila. Las parcelas testigo (TES) y de aplicaciones de protectores fueron de 15 m de largo y una fila. Las mediciones fueron realizadas en los tres árboles centrales.

En cada repetición se marcaron frutos a una altura entre 1,5 y 2m en las siguientes condiciones: a) expuesto y sin daño de sol visible (FEV); b) expuesto y con coloración roja (FER); c) expuesto y con daño incipiente de sol (FEQ) (bronceado, de acuerdo a Racsko and Schrader (28)); d) interno sin daño de sol visible (FIV) (**Figura 1**). Los frutos fueron marcados y se definió la cara expuesta hacia la entrefila de la plantación, con exposición directa a la radiación solar y la cara interna orientada hacia el tronco, sin exposición directa a la radiación solar. En la temporada 4, para cada condición de fruto de los tres cultivares se muestrearon frutos para la determinación de potencial

hídrico del tejido  $\Psi_F$ , en ambas caras (externa  $\Psi_{FE}$  e interna  $\Psi_{FI}$ ). A cosecha la fruta fue clasificada de acuerdo al grado de quemado de sol como: sin daños visibles (FS); con quemado leve, coloraciones blancas o amarillas menor al 25% del fruto (QL); con quemado moderado, entre 25 y 50% de la superficie (QM); y frutos con más del 50% de quemado o con necrosis (QS). En las temporadas 1 y 2 fue evaluado el comportamiento poscosecha en un experimento factorial de tres factores, tratamiento de campo (5 niveles), condición del fruto en cosecha, FS y QL (2 niveles) y aplicación de antiescaldante (2 niveles). Luego de la conservación la fruta fue clasificada según el grado de escaldado como: fruta sana (FS), fruta con escaldado de color amarillo o amarronamiento suave y superficie menor al 25% (FEL), fruta con escaldado color amarillo o amarronamiento suave y superficie cercana al 50% (FEM) y fruta con escaldado de color marrón intenso y/o superficie afectada mayor a 75% (FES). La unidad experimental consistió en una caja con un promedio de 78 frutos y contó con 3 repeticiones. Cada repetición fue paletizada y conservada en cámara frigorífica comercial a temperatura de 0 - 1°C y 95% HR. El tratamiento antiescaldante varió en las temporadas, siendo Difenilamina (DPA) en la temporada 1 y 1-Metilciclopropeno (1-MCP) en la temporada 2. (Figura I).

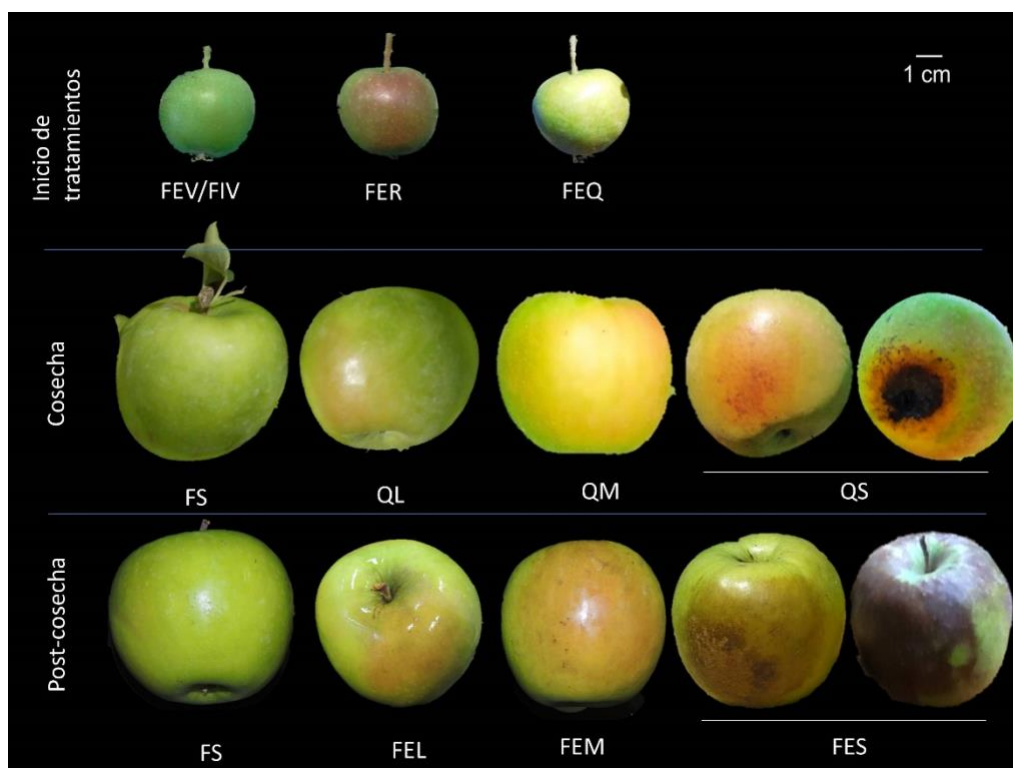


Figura I. Ejemplos de categorías de frutos. Al inicio de los tratamientos (6 semanas después de la plena floración) FEV =fruto externo verde; FIV=fruto interno verde, FER=Fruto externo rojo, FEQ=fruto externo quemado.

En la cosecha FS=fruto sano, QL=fruto ligeramente quemado por el sol, QM=fruto moderadamente quemado por el sol, QS=fruto severamente quemado por el sol

En la poscosecha FS=fruto sano, FEL=fruto ligeramente escaldado, FEM=fruto moderadamente escaldado, FES=fruto severamente escaldado.

**2.2 Principales resultados y discusión.** - La variabilidad reportada en el daño concuerda con la variabilidad climática descrita por Tiscornia et al. (34) y puede explicarse por el análisis de las variables climáticas de cada año en particular (33).

En el presente estudio las temperaturas de aire fueron variables entre años y modificadas por los tratamientos de mallas mientras que las temperaturas de superficie de fruto presentaron diferencias significativas en relación con el tratamiento y al tipo de fruto (FEQ, FER, FEV o FIV). Los tratamientos PRO y TES presentaron las temperaturas de fruta más altas, con un 35 y 43% de valores sobre 46°C (umbral de TSF para el desarrollo de quemado), el tratamiento MN35 14% y los tratamientos MB y MN50 no presentaron temperaturas por encima de dicho umbral. Los frutos FEQ mostraron mayores medias de TSF (43°C) y la mayor dispersión, mientras que los frutos FEV presentaron la menor dispersión y una media de 39°C, menor a FEQ e igual a FER y FIV (11).

Los tratamientos MN50 y MB también modificaron la radiación incidente sobre el cultivo, en función de la transmitancia. En el rango PAR de longitudes de onda, ésta fue de 0,40 ( $\pm$  0,03) y 0,70 ( $\pm$  0,03) respectivamente. En el IR cercano (entre 700 y 800 nm) la transmitancia de MB aumenta hasta valores cercanos al 100% mientras que en el caso de MN50 disminuye a valores en el entorno de 0,35 (11).

En el año en que fue evaluado, el potencial hídrico de xilema de Granny Smith mostró diferencias entre los distintos manejos realizados. Los valores más negativos son presentados por MB (0,825 MPa), alcanzando diferencias significativas con PRO y MN50, pero no con TES. El tratamiento MN50 fue el que presentó los valores más cercanos a cero que difieren del tratamiento control y de los otros dos tratamientos (-0,54 MPa) (35).

Los coeficientes de correlación de Pearson calculados para las distintas variables evaluadas alcanzaron un máximo de 0,75 entre  $\Psi_{FE}$  y [prolina]. La [clorofila] (CHL) medida en laboratorio presentó correlaciones negativas de 0,42 con  $\Psi_F$  y de 0,57 con [prolina]. La relación entre  $\Psi_{FE}$  y [prolina], CHLa y  $\Psi_{FE}$ , tuvieron el mejor ajuste con una regresión polinómica de 2° grado y un  $r^2$  máximo de 0,60 (33).

El  $\Psi$  de frutos sanos evaluado para cada una de las condiciones (fruto y cultivar) no presentó diferencias entre ambas caras en ninguna de las fechas de evaluación. Para Cripps Pink las diferencias entre las caras se presentaron en FEQ en las evaluaciones de mitad y fin de ciclo, con una media de la diferencia de 0,5 MPa, mientras que FER no presentaron diferencia entre  $\Psi_{FE}$  y  $\Psi_{FI}$ . Granny Smith mostró un potencial hídrico menor en la cara externa en las dos últimas fechas en FEQ y FER, siendo el promedio de las diferencias entre caras de 0,45 MPa y 0,27 MPa, respectivamente. Brasil Gala no presentó diferencias entre caras en ninguna condición (35).

La evolución del quemado de sol varió entre estaciones, condiciones de fruto y tratamientos aplicados. En los frutos caracterizados como FIV el porcentaje de quemado nunca superó el 20%, mientras que en los frutos FEQ presentaron porcentajes de quemado final entre 50 y 100% en todas las temporadas estudiadas y bajo todos los tratamientos. Valores intermedios se registraron en los frutos FER y FEV con mayores variaciones entre tratamientos y estaciones. Para FER los valores máximos de quemado bajo malla (MN35, MN50, MB) fueron de 75%. En el tratamiento PRO y el TES de la estación 2 alcanzaron valores cercanos al 100%. Los FEV presentaron daños de quemado de sol superiores al 50% en los tratamientos TES y PRO y menores a dicho valor para los tratamientos bajo malla (MB, MN35 y MN50) (33).

Los productos antiescaldado variaron en las temporadas (DPA y 1-MCP), no obstante, en ambas



temporadas el modelo fue significativo para los tratamientos de campo (TES, PRO, BN35, BN50 y MB), el estado de la fruta al entrar en cámara frigorífica (FS o QL), el tiempo de almacenamiento y el tratamiento poscosecha, así como sus interacciones. Las evaluaciones sucesivas de todas las condiciones registraron aumento de los daños, tanto en incidencia como en severidad. Los frutos sin evidencia de quemadura solar (FS) antes del almacenamiento en frío presentaron mayores proporciones de frutos sin escaldadura (FS) durante el almacenamiento. Ambos antiescaldantes tuvieron efectos similares aumentando la proporción de FS y reduciendo los frutos con escaldado moderado y severo (FEM y FES) (11).

**3. Conclusiones.** - El presente trabajo fue propuesto con el objetivo de contribuir a la comprensión de la adaptación del cultivo de manzana a las condiciones de clima neotropical y analizar estrategias de manejo que permitan superar las principales limitantes impuestas sobre la calidad de fruta en términos de desórdenes fisiológicos. Para ello, basamos el estudio en las siguientes hipótesis: que existen condiciones de estrés abiótico que determinan la aparición de desórdenes fisiológicos; que existe correlación entre estos desórdenes y una serie de parámetros fisiológicos como potencial hídrico de tejido, concentración de sustancias reactivas al oxígeno, pigmentos y prolina; que es posible la caracterización de los frutos mediante espectroradiometría durante el período de crecimiento y que esta caracterización puede constituir una herramienta de predicción de daños y que existen estrategias de manejo capaces de reducir la pérdida de calidad por desórdenes fisiológicos.

Respecto de las condiciones predisponentes para el quemado, durante el período de estudio se registró una alta variabilidad. Se presentaron condiciones favorables a la ocurrencia de daños tanto en los aspectos referidos a temperaturas máximas como a déficits hídricos. Las temperaturas máximas alcanzaron los máximos históricos (39 °C) y los balances hídricos (con riego) presentaron valores de hasta -150 mm.

De la relación de los factores analizados y la expresión de daños se puede concluir que la disponibilidad de agua en el suelo fue la condición más relacionada con el daño por sol.

El estudio de la evolución de los daños de sol juntamente con el análisis de indicadores fisiológicos destructivos y no destructivos permitió contribuir a la definición de estrategias tendientes a elaborar métodos de predicción de daños. Los abordajes no destructivos están aún en desarrollo y los resultados obtenidos al respecto en este trabajo no permitieron seleccionar ni generar un índice espectroradiométrico que cumpla dicho objetivo. El índice de espectroradiometría PSRI480 fue el de mayor capacidad de discriminación entre frutos sanos y frutos dañados, pero no pudo establecerse un índice capaz de anticipar el desarrollo de desórdenes fisiológicos en campo mediante espectroradiometría. Entre los abordajes destructivos, el potencial hídrico de fruto y la concentración de prolina en los tejidos del fruto presentaron la mayor capacidad de discriminar entre frutos sanos y dañados.

Los avances en la discriminación entre frutos dañados y sanos no implican la capacidad de predecir daños; sin embargo, los métodos de predicción podrían continuar desarrollándose basados en la determinación de condiciones de fruta dañada cuando el daño tiene aún posibilidades de reversión. En este sentido, y considerando los indicadores evaluados en este trabajo, las diferencias de potencial hídrico entre las caras del fruto y la concentración de prolina (como indicadores destructivos) y el índice de espectroradiometría PSRI480 (como indicador no destructivo) presentan las mejores características.

La importancia de la predicción de desórdenes fisiológicos radica en el hecho de que la mayoría de ellos se manifiestan luego del almacenamiento refrigerado. Dicha condición determina que más allá de las posibles pérdidas directas en cosecha o procesamiento de fruta inmediatamente luego de esta, el sector productivo presente pérdidas luego de haber adicionado a los costos de producción de campo los costos asociados al almacenamiento. Esta pérdida de rendimiento comercial luego de incurridos los costos de producción y de almacenamiento reducen la sostenibilidad económica de la producción.

El desarrollo de métodos de predicción, fundamentalmente de aquellos desórdenes fisiológicos que se manifiestan luego de la conservación frigorífica (bitter pit y escaldado por sol), podría constituir una herramienta de gran valor para reducir las pérdidas de fruta y mejorar las perspectivas del sector productivo.

Los manejos propuestos permitieron modificar los factores predisponentes y la presencia de síntomas. La temperatura de aire se redujo únicamente en el tratamiento MN50, sin embargo, la temperatura de la fruta sí fue menor en todos los tratamientos de malla. Los tratamientos TES y PRO presentaron los mayores valores de temperatura de fruto y los tratamientos MN50 y MB presentaron los menores valores. El tratamiento MN50 redujo los valores de temperatura máxima del aire en el período registrado, presentó los valores de potencial de xilema menos restrictivos y las menores temperaturas de fruto. El tratamiento MB, sin embargo, no generó condiciones favorables para la reducción del daño de quemado de sol, ni respecto de la temperatura del aire ni respecto del potencial hídrico de xilema. En ambos tratamientos de malla, el comportamiento del daño, las temperaturas de aire y de fruta, así como la condición hídrica se relacionaron con las modificaciones realizadas sobre la radiación incidente. Mallas negras y blancas redujeron en diferente magnitud pero con un perfil similar, la radiación en las distintas longitudes de onda del rango PAR mientras que las diferencias de comportamiento respecto de la transmitancia para ambos colores de malla se detectaron en el rango entre 350 y 425 nm y entre 700 y 800 nm. El incremento de radiación infrarroja (>740 nm) es de gran aporte calórico y podría estar relacionado a los aumentos de temperatura del aire registrados en el tratamiento de malla blanca. Respecto a las variables crecimiento vegetativo, crecimiento de fruto, inducción y diferenciación floral, no se vieron afectados en los rangos de modificación de la radiación de los tratamientos de malla.

Respecto de la manifestación de síntomas, los manejos instalados mostraron resultados variados. Si bien todos los tipos de malla presentaron valores de quemado menores al testigo, solo el tratamiento MN50 alcanzó diferencias significativas en los daños de quemado a cosecha. Por su parte, en la expresión de sunscald los tratamientos bajo malla y en particular el tratamiento MN50 presentaron siempre menores daños. Los tratamientos de protectores solares no presentaron mejoras en la expresión de daños en campo ni luego del almacenamiento.

La importancia social y económica del cultivo de manzana, establece la necesidad de estudiar y contribuir al desarrollo de medidas de manejo que mejoren su sustentabilidad. La evolución de las condiciones climáticas indica la presencia de una mayor ocurrencia de condiciones predisponentes para el desarrollo de desórdenes fisiológicos; por tanto, los estudios de adaptación ecofisiológica y de medidas de manejo adaptadas a las condiciones locales adquieren gran relevancia. Entre las medidas de manejo se encuentran las de mitigación de los efectos, como la colocación de mallas de sombreamiento o las de adaptación como las herramientas de predicción, ambas abordadas en el presente estudio y con resultados muy promisorios.

Desde el punto de vista de las herramientas de control, el establecimiento de las medidas de manejo para cultivares coloreados implica un desafío que debería estudiarse en futuros trabajos, fundamentalmente en el caso de Cripps pink ya que es el cultivar coloreado en el que se expresan con mayor frecuencia los desórdenes fisiológicos vinculados al daño por sol.

Desde el punto de vista de la prevención y predicción, los aspectos relativos al estatus hídrico del cultivo (estudio de potenciales hídricos y contenidos de prolina) parecen establecerse como promisorios para profundizar desde el conocimiento básico y contribuir a generar herramientas aplicadas al ámbito productivo. En este sentido parece relevante avanzar en estudios realizados en condiciones de crecimiento controlado, en donde se manejen los factores predisponentes y se permita evaluar los estados iniciales y reversibles de la expresión de daños.

#### 4. Referencias

- [1] MGAP-DIEA. (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca – Dirección de estadísticas Agropecuarias) Anuario estadístico. [en línea]. 2014. Consultado 04/03/2021, disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Documentos%20compartidos/Anuario2014/Diea-Anuario%202014-Digital01.pdf>
- [2] Gazzano I, Achkar M, Apezteguía E, Ariza J, Gómez Perazzoli A, Pivel J. Ambiente y crisis en Uruguay. *Revista de Ciencias Sociales*. 2021.34:13–40
- [3] Dogliotti S, García MC, Peluffo S, Dieste, JP, Pedemonte AJ, Bacigalupe GF, Scarlato M, Alliaume F, Alvarez J, Chiappe M, Rossing WAH. Co-innovation of family farm systems: A systems approach to sustainable agriculture. *Agricultural Systems*. 2014. 126:76–86. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.02.009>
- [4] MGAP-DIEA. (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca – Dirección de estadísticas Agropecuarias). Encuesta frutícola de hoja caduca Zafra [en línea]. 2016. Consultado 04/03/2021, disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/encuesta-fruticola-hoja-caduca-zafra-2016-nro-338>
- [5] Proexport. Frutas Frescas. Uruguay XXI Instituto de Promoción de Inversiones y Exportaciones. 2013.12p.
6. XXI Uruguay. Producción y comercio exterior frutas frescas Inteligencia competitiva. URUGUAY XXI Instituto de Promoción de Inversiones y Exportaciones. 2016.
7. Feippe A, Muller I, Echeverría G, Lamarca N, Chiesa N, Viñas I, Albín A, Teixido N. Calidad de la carne y otros distintos sistemas productivos; componente frutas, manzana y citrus. Serie técnica n.º 163 INIA, Uruguay. 2007. 58p. ISBN: 978-9974-38-231-2
8. Feippe A. Desordenes fisiológicos y problemas más comunes observados durante el almacenamiento de manzanas, peras y ciruelas en Uruguay. *Boletín de divulgación INIA n.º 55*. Uruguay. 1995. 16p. ISBN: 9974-38-048-0
9. Feippe A, Rebellato J, Fredes A, Severino V. Jornada de divulgación: mancha lenticelar. Programa de Investigación en Producción Frutícola. Serie Actividades de Difusión n.º 649. 2011. pp 1–30
10. Reig G, Donahue DJ, Jentsch P. The Efficacy of Four Sunburn Mitigation Strategies and Their Effects on Yield , Fruit Quality , and Economic Performance of Honeycrisp Cv . Apples under Eastern New York ( USA ) Climatic Conditions. *International Journal of Fruit Science*. 2019. 0:1–21. doi: 10.1080/15538362.2019.1605558
11. Severino V, Arias-Sibillotte M, Dogliotti S, Frins E, Yuri J A, González-Talice J. Pre- and Postharvest Management of Sunburn in ‘Granny Smith’ Apples (*Malus×domestica* Borkh) under Neotropical Climate Conditions. *Agronomy*. 2021. (11)1618. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/8/1618>
12. Tripathi DK. Plant life under changing environment responses and management, Academic. London. 2020. 520p.
13. Ramírez F, Kallarackal J. Ecophysiology of temperate fruit trees in the tropics. *Advances in Environmental Research*. 2014. 31:89–101

14. Bernardi, R.E., Holmgren, M., Arim, M., Scheffer, M., Why are forests so scarce in subtropical South America? The shaping roles of climate, fire and livestock. *For. Ecol. Manage.* 2016. (363) 212–217.
15. FAO-MGAP (Food and Agriculture Organization – Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca), Sensibilidad y capacidad adaptativa de la viticultura y la fruticultura frente al cambio climático. Volumen VI de Clima de cambios: nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Autores: Ferrer M; Camussi G; Fourment M, Varela V; Pereyra G; Taks J, Contreras S; Cruz G; Astigarraga L; Picasso V. Resultado del proyecto FAO TCP URU 3302, Montevideo. Corrección de estilo: Galván M. Diseño: Grille E. 2013. Disponible en: <http://www.fao.org/climatechange/84982/es>
16. Giménez A, Lanfranco B. Adaptación al cambio climático y la variabilidad : algunas opciones de respuesta para la producción agrícola en Uruguay. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 2012. 3:611–620
17. Glenn DM, Yuri JA. Photosynthetically active radiation (PAR)×ultraviolet radiation (UV) interact to initiate solar injury in apple. *Scientia Horticulturae.* 2013. 162:117–124. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.07.037>
18. Torres CA, Sepúlveda A, González-Talice J, Yuri JA. Razmilic I. Fruit water relations and osmoregulation on apples (*Malus domestica* Borkh.) with different sun exposures and sun-injury levels on the tree. *Scientia Horticulturae.* 2013. 161:143–152. doi: 10.1016/j.scienta.2013.06.035
19. Mupambi G. Water relations and sunburn in apple fruit. Dissertation presented for the degree of Doctor of Philosophy (Agric) in the Faculty of AgriScience at Stellenbosch University. 2017. 256p
20. Ferguson I, Volz R, Woolf A. Preharvest factors affecting physiological disorders of fruit. *Postharvest Biology and Technology.* 1999. 15:255–262. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00089-1)
21. Schrader L, Sun J, Zhang J, Felicetti D, JUN T. Heat and Light-Induced Apple Skin Disorders: Causes and Prevention. *Acta Horticulturae.* 2008. 51–58.
22. Lin-Wang K, Micheletti D, Palmer J, Volz R, Lozano L, Espley R, Hellens RP, Chagné D, Rowan DD, Troglio M, Iglesias I, Allan A C. High temperature reduces apple fruit colour via modulation of the anthocyanin regulatory complex. *Plant, Cell & Environment.* 2011. 34:1176–90. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02316.x>
23. Torres CA, León L, Sánchez-Contreras J. Spectral fingerprints during sun injury development on the tree in Granny Smith apples: A potential non-destructive prediction tool during the growing season. *Scientia Horticulturae.* 2016. 209:165–172. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.06.024>
24. Monge E, Val J, Sanz M, Montañés ABL. El calcio nutriente para las plantas. Bitter pit en manzano. *Anales de la Estación Experimental de Aula Dei (Zaragoza).* 1994. Vol. 21, n.3: 189-201
25. Lötze E, Theron KI. Evaluating the Effectiveness of Pre-Harvest Calcium Applications for Bitter Pit Control in ‘Golden Delicious’ Apples Under South African Conditions. *Journal of Plant Nutrition.* 2007. 30:471–485. <https://doi.org/10.1080/01904160601172098>
26. Yuri JA. Daño por sol en manzanas. *Fruticultura.* 2010. 8:2–9

27. Szabó A, Tamás J, Nagy A. The influence of hail net on the water balance and leaf pigment content of apple orchards. *Scientia Horticulturae*. 2021. 283: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110112>
28. Racsco J, Schrader LE. Sunburn of Apple Fruit: Historical Background, Recent Advances and Future Perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2012. 31:455–504. <https://doi.org/10.1080/07352689.2012.696453>
29. Yuri JA, Neira A, Fuentes M, Razmilic I, Lepe V, González MF. Bagging cv. Fuji, Raku Raku Apple Fruit Affects Their Phenolic Profile and Antioxidant Capacity. *Erwerbs-Obstbau*. 2020. 62:221–229. <https://doi.org/10.1007/s10341-020-00475-0>
30. Tartachnyk I, Kuckenbergh J, Yuri JA, Noga G. Identifying fruit characteristics for non-invasive detection of sunburn in apple. *Scientia Horticulturae*. 2012. 134:108–113. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.11.009>
31. Solovchenko AE, Chivkunova OB, Gitelson AA, Merzlyak MN. Non-Destructive Estimation Pigment Content , Ripening , Quality and Damage in Apple Fruit with Spectral Reflectance in the Visible Range. *Fresh Produce*. 2010. 4:91–102
32. Solovchenko A, Dorokhov A, Shurygin B, Nikolenko A, Velichko V, Smirnov I, Khort D, Aksenov A, Kuzin A. Linking tissue damage to hyperspectral reflectance for non-invasive monitoring of apple fruit in orchards. *Plants*. 2021. 10:1–15. <https://doi.org/10.3390/plants10020310>
33. Severino V, Arias-Sibillotte M, Dogliotti S, Frins E, González-Talice J, Yuri J A. Climatic and physiological parameters related to the progress and prediction of apple sunburn damage in a neotropical climate. *Advances in Horticultural Science*. 2020. 34:431–440. <https://doi.org/10.13128/ahsc>
34. Tiscornia, G., Cal, A., Giménez, A., Análisis y caracterización de la variabilidad climática en algunas regiones de Uruguay. *RIA Rev. Investig. Agropecu*. 2016. 42, 66–71.
35. Severino, V. Estrés abiótico en clima neotropical influencia la producción de pigmentos, capacidad antioxidante y expresión de desórdenes fisiológicos en manzanas. Tesis de doctorado. Universidad de la República (Uruguay). 2022. Facultad de Agronomía. Unidad de Posgrados y Educación Permanente.

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

VS ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

# Sistema de monitoreo y control de cultivo indoor de cannabis

## *Monitoring and control system for an indoor cannabis cultivation*

### *Sistema de monitoramento e controle para um cultivo interno de cannabis*

Carlos Menoni<sup>1</sup>, Diego Alonso<sup>2</sup>, Felipe Saravia<sup>3</sup>, Nicolás Pérez<sup>4</sup>, Leonardo Steinfeld<sup>5</sup>

Recibido: 10/06/2023

Aceptado: 10/06/2023

**Resumen.** - El cultivo de tipo *indoor* es ampliamente utilizado a nivel mundial debido a su capacidad de desarrollar plantas en un entorno controlado. En él, se gestionan artificialmente los elementos necesarios para el crecimiento vegetal controlado. En Uruguay, varios emprendimientos han surgido aplicando esta técnica de cultivo desde la aprobación de la ley que regula la actividad productiva del cannabis. Como en cualquier proceso productivo, el cultivo *indoor* presenta diversos desafíos tecnológicos que buscan optimizar su rendimiento.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de un sistema de monitoreo y control aplicado a un invernadero de cannabis para producción *indoor*. Se incluye el análisis realizado para identificar las variables relevantes que deben ser monitoreadas y la selección de procesos a ser automatizados. Además, se describe el desarrollo de una red inalámbrica que consta de una serie de sensores para diferentes variables y un conjunto de actuadores distribuidos. Estos componentes, registran las variables del proceso y proporcionan información que se almacena en una base de datos y se visualiza a través de una interfaz de usuario. Las variables monitoreadas incluyen la humedad y temperatura del suelo, la humedad y temperatura ambiente, la concentración de CO<sub>2</sub>, el estado de la luz y el nivel de pH del agua.

La red se compone de un computador supervisor con conexión a internet y unidades distribuidas. Las unidades distribuidas se implementan como Unidades de Control Distribuido (UCD) y Nodos Maceta (NM). Estos elementos trabajan con módulos *System-on-Chip*, con un enlace de radio que permite establecer comunicaciones siguiendo el estándar IEEE 802.15.4. Utilizan el sistema operativo Contiki-NG, diseñado para implementar una red de comunicación inalámbrica 6LoWPAN y utilizan el protocolo CoAP en la capa de aplicación.

Esperamos que este trabajo contribuya al desarrollo de sistemas distribuidos de monitoreo y control, aplicados a la producción agrícola.

**Palabras clave:** 6LoWPAN; cultivo indoor; cannabis; monitoreo; control.

---

<sup>1</sup>Ingeniero Electricista, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UDELAR), Uruguay; carlos.menoni@fing.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-7344-3533>

<sup>2</sup>Ingeniero Electricista, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UDELAR), Uruguay; diego.alonso.ruiz@fing.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-7298-0354>

<sup>3</sup>Ingeniero Electricista, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UDELAR), Uruguay; felipe.saravia@fing.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0009-1504-7948>

<sup>4</sup>Doctor Ingeniero Electricista, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UDELAR), Uruguay; nico@fisica.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8043-5383>

<sup>5</sup>Doctor Ingeniero Electricista, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UDELAR), Uruguay; leo@fing.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6587-425X>



**Summary.** - Indoor cultivation is widely used due to its advantages for growing plants in a controlled environment. In this method, the necessary elements for plant growth are artificially managed. In Uruguay, several ventures have emerged applying this cultivation technique since the approval of the law that regulates cannabis production. Like any production process, indoor cultivation presents various technological challenges aimed at optimizing its performance.

This paper presents the results obtained in the development of a monitoring and control system applied to an indoor cannabis greenhouse. It includes the analysis carried out to identify the relevant variables to be monitored and the selection of processes to be controlled. Furthermore, the development of a wireless network is described, consisting of a series of sensors for different variables and a set of distributed actuators. These components record the process variables and provide information that is stored in a database and visualized through a user interface. The monitored variables include soil humidity and temperature, ambient humidity and temperature, CO<sub>2</sub> concentration, light level, and water pH level.

The network is composed of a supervisory computer with internet connection and distributed units. There are two types of distributed units: Distributed Control Units (DCUs) and Pot Nodes (PNs). These elements work with System-on-Chip modules, with a radio link that allows communications following the IEEE 802.15.4 standard. They use the Contiki-NG operating system, designed to implement a 6LoWPAN wireless communication network, and utilize the CoAP protocol at the application layer.

We hope that this work contributes to the development of distributed monitoring and control systems applied to agroindustry.

**Keywords:** 6LoWPAN; indoor; cannabis; monitoring; control.

**Resumo.** - O cultivo interno é amplamente utilizado devido às suas vantagens para o cultivo de plantas em um ambiente controlado. Nesse método, os elementos necessários para o crescimento das plantas são gerenciados artificialmente. No Uruguai, surgiram vários empreendimentos aplicando esta técnica de cultivo desde a aprovação da lei que regulamenta a produção de cannabis. Como qualquer processo produtivo, o cultivo indoor apresenta diversos desafios tecnológicos que visam otimizar seu desempenho.

Este artigo apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle aplicado a uma estufa interna de cannabis. Inclui a análise realizada para identificar as variáveis relevantes a serem monitoradas e a seleção dos processos a serem controlados. Além disso, é descrito o desenvolvimento de uma rede sem fio, composta por uma série de sensores para diferentes variáveis e um conjunto de atuadores distribuídos. Esses componentes registram as variáveis do processo e fornecem informações que são armazenadas em um banco de dados e visualizadas por meio de uma interface com o usuário. As variáveis monitoradas incluem umidade e temperatura do solo, umidade e temperatura ambiente, concentração de CO<sub>2</sub>, nível de luz e nível de pH da água.

A rede é composta por um computador supervisor com conexão à internet e unidades distribuídas. Existem dois tipos de unidades distribuídas: Distributed Control Units (DCUs) e Pot Nodes (PNs). Esses elementos funcionam com módulos System-on-Chip, com um link de rádio que permite comunicações seguindo o padrão IEEE 802.15.4. Utilizam o sistema operacional Contiki-NG, projetado para implementar uma rede de comunicação sem fio 6LoWPAN, e utilizam o protocolo CoAP na camada de aplicação.

Esperamos que este trabalho contribua para o desenvolvimento de sistemas distribuídos de monitoramento e controle aplicados à agroindústria.

**Palavras-chave:** 6LoWPAN; interior; maconha; monitoramento; ao controle.

**1. Introducción.** - Uruguay cuenta con una de las culturas de cannabis más desarrolladas a nivel mundial, siendo pionero en la legislación de la planta para sus diversos usos. Desde 2013 se han establecido regulaciones para la producción, comercialización y consumo del cannabis [1]. Esta iniciativa genera un marco legal que ha permitido abrir el camino para explorar sus diferentes aplicaciones.

La ley del año 2013, entre otras disposiciones, habilita el autocultivo por parte de individuos o clubes de consumidores (asociaciones sin fines de lucro para la producción y distribución legal de cannabis). Asimismo, se estipula la regulación de permisos a empresas privadas para el cultivo de marihuana psicoactiva orientado al uso medicinal o recreativo, cultivo de cáñamo para usos industriales y cultivo con fines de investigación.

El cultivo de tipo *indoor* es una alternativa atractiva para productores particulares, clubes cannábicos y empresas. Se denomina cultivo *indoor* a la producción agrícola de plantas en locales cerrados, donde se controlan las variables ambientales del entorno, gestionando de forma artificial todos los elementos necesarios para el crecimiento (luz, agua, nutrientes, etc.). Si bien este método es más complejo y costoso que una plantación natural, permite acelerar el ciclo natural de la planta, generando mejores rendimientos productivos y eliminando la dependencia de las condiciones climáticas. Es una técnica de uso extendido en la producción de flores, sustancias aromáticas y vegetales de alto valor agregado [2]. Además, es común la producción a gran escala de vegetales de forma hidropónica *indoor*, como la lechuga [3]. Al ser el cannabis un producto de alto valor agregado, esta forma de producción se ha hecho una práctica habitual [4].

La producción *indoor* presenta diversos desafíos tecnológicos, ya que todo el ciclo productivo de la planta se realiza en forma artificial. En él, se destacan el control de la iluminación, el control de la calidad del agua suministrada a las plantas y el control de nivel de CO<sub>2</sub> de la habitación de cultivo.

El presente trabajo resume parte del desarrollo hecho para la automatización y control de un cultivo *indoor* de cannabis y constituyó el trabajo final de grado de los autores para su formación como Ingenieros Electricistas en la Universidad de la República [5]. La organización del trabajo es la siguiente: primero se describe el proceso productivo, luego se presenta la arquitectura de la solución implementada. En las secciones 4 y 5 se describen algunos detalles de diseño de las placas electrónicas y de comunicaciones, respectivamente. En la sección 6 se desarrolla el monitoreo y su despliegue en pantallas, y en la sección 7 los lazos de control. Finalmente se presentan las conclusiones generales del trabajo.

## **2. Descripción del proceso productivo. -**

**2.1 Ciclo de la planta.** - La producción de cannabis *indoor* busca reducir la duración del ciclo productivo de la planta para la obtención de la floración rica en THC, que es un cannabinoide con poder psicoactivo [6].

Cuando se cultiva de forma natural, en las regiones no tropicales, se tiene una única cosecha anual, comenzando el ciclo en primavera con la germinación de la planta y terminando con la cosecha de otoño.

El cultivo *indoor* divide el proceso en cuatro etapas:

**2.1.1 Clonación.** - Como forma de acelerar el proceso y obtener una genética homogénea en la producción, se utiliza la clonación a partir de brotes de la planta. El proceso biológico comienza con la obtención de esquejes de plantas maduras, que luego se colocan en un sistema de aeroclونación. Este sistema mantiene los esquejes hidratados permitiendo el desarrollo de los primeros brotes de raíz (ver Figura I). Normalmente este proceso dura 2 semanas.



Figura I.- Aeroclonador para la obtención de botes de cannabis

**2.1.2 Crecimiento vegetativo.** - En esta etapa, la planta se desarrolla y gana volumen. Se realiza el trasplante a recipientes de mayor volumen y se obtienen esquejes para reiniciar el ciclo de clonación. El régimen de iluminación artificial es de dieciocho horas de luz contra seis horas de oscuridad, simulando días de primavera y verano. La etapa finaliza cuando la planta tiene suficientes tallos y ramas para producir flores. La Figura II muestra plantas que han ganado volumen, pero no han comenzado la floración. Típicamente este proceso dura alrededor de 4 semanas.



Figura II.- Etapa de crecimiento vegetativo.

**2.1.3 Floración.** - En esta etapa, las plantas ya están maduras y comienzan a producir flores. Se trasladan a una sala con un período de iluminación de doce horas de luz y doce de oscuridad. De esta forma, se induce a la planta a iniciar la floración, al simular las condiciones naturales del otoño. La Figura III muestra plantas en la sala de floración. Note la distribución con separadores para maximizar y homogenizar la llegada de luz a todas las ramas de las plantas. Este proceso suele durar unas ocho semanas.



Figura III.- Etapa de Floración.

**2.1.4 Secado.** - Cuando las flores tienen el tamaño indicado, se cosechan las plantas cortando sus ramas florecidas. Estas ramas se colocan en una sala para realizar su secado. Una vez que alcanzan la textura deseada por el productor, se recortan las flores y se empaquetan para su distribución.

La duración total del proceso es de catorce a dieciséis semanas. La producción *indoor* presenta como ventajas el ciclo productivo reducido, la posibilidad de tener hasta cuatro cosechas al año, la independencia de las condiciones climáticas y un producto mucho más homogéneo.

**2.2 Variables de interés.** - El objetivo del proyecto es el desarrollo de un sistema de monitoreo de las variables de producción más relevantes y la implementación de algunos lazos de control que automaticen las tareas del cultivador. Existen muchas fuentes de información que describen las variables de interés [8, 9]. Podemos citar: iluminación, humedad y temperatura del suelo, humedad y temperatura ambiente, concentración de CO<sub>2</sub>, ventilación del aire y concentración de oxígeno y nutrientes en el suelo.

Se reconoce que la iluminación es el parámetro más relevante, dado que no solo incide en el crecimiento de la planta y en el ciclo de floración, sino que también influye sobre el resto de los parámetros. Además, es el principal factor económico en un cultivo de tipo *indoor*, por lo que es importante para la sustentabilidad y eficiencia de la producción.

La temperatura también acompaña el ciclo de iluminación, fijándose un intervalo de 25 °C a 30 °C para las horas de luz y 15 °C a 25 °C en oscuridad. Esto, sumado al hecho de que la iluminación aporta una cantidad de energía considerable en forma de calor, implica cierta complejidad en la climatización de la sala, siendo que en algunos momentos se debe refrigerar el ambiente (verano con las luces encendidas) y en otros se debe calefaccionar (invierno con las luces apagadas).

La humedad ambiente influye en el control de plagas y enfermedades de la planta, por lo que se debe mantener en el entorno de 60 % de humedad relativa.

El CO<sub>2</sub> es fundamental para la fotosíntesis, dado que la planta consume este gas y libera oxígeno. Se tiene como nivel óptimo para el CO<sub>2</sub> el entorno de 400 ppm.

La ventilación evita la disminución del CO<sub>2</sub> y el aumento excesivo de humedad en el aire, además de influir en la temperatura de las salas. Si bien no se tiene una cuantificación de esta variable, es importante mantener ventilado el ambiente de las plantas.

Finalmente, el suelo debe tener las condiciones propicias para el crecimiento de la planta. Para ello debe mantenerse un nivel correcto de nutrientes y oxígeno.

Además, la calidad del agua es de gran importancia para el crecimiento de las plantas. Dado que el agua utilizada para el riego suele provenir del suministro público, se debe realizar un tratamiento antes de llevarla a las plantas, manteniendo el pH en un entorno de 6, reduciendo las concentraciones de cloro y agregando nutrientes periódicamente.

**3. Arquitectura del sistema.** - El objetivo del desarrollo es implementar un sistema que permita el monitoreo de las variables del proceso, y el control de algunos lazos que se identifican como importantes. Para ello se implementa una arquitectura de controladores distribuidos (DCS) con una jerarquía de dos niveles: nivel de operación y nivel de control.

El nivel de operación se implementa en una Unidad Central (UC). Esta unidad es la encargada de administrar la información de monitoreo y control, tanto en cuanto a las comunicaciones como al manejo de la base de datos local. Además, ejecuta el software dedicado a la interfaz con el usuario y se encarga de mantener la comunicación del sistema con la red global de internet, permitiendo el acceso remoto al sistema.

El nivel de control cuenta con dos tipos de unidades: las Unidades de Control Distribuido (UCD) y los Nodos Maceta (NM). Si bien ambas unidades tienen distintas funciones particulares, en términos generales ambas manejan los sensores y actuadores y ejecutan algunos procesamientos de cálculo y control. A su vez, se comunican con la UC y entre sí, mediante una red inalámbrica interna basada en el protocolo 6LoWPAN.

En la Figura IV se presenta de forma gráfica la arquitectura general del sistema.

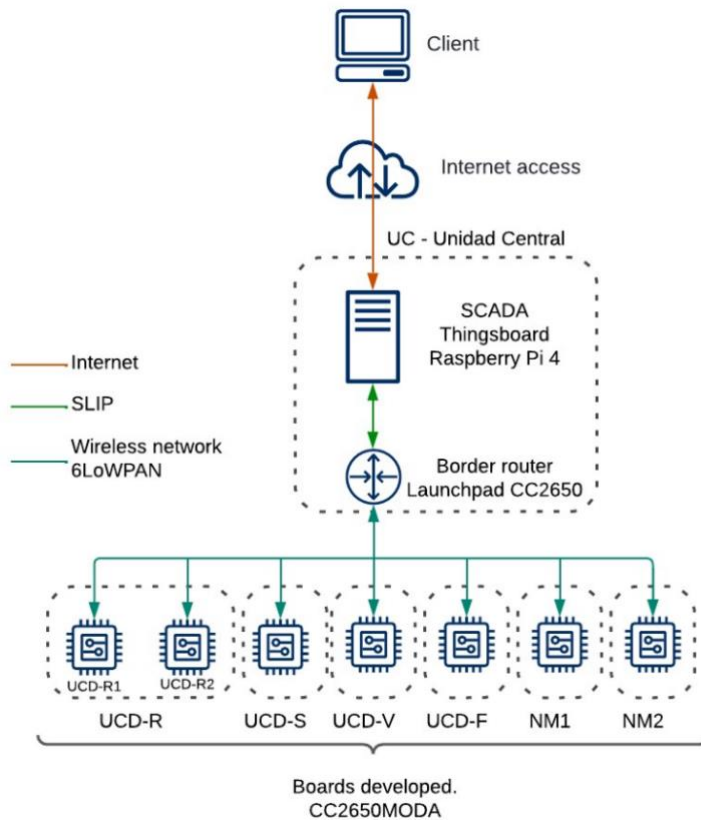


Figura IV.- Arquitectura de la red de monitoreo y control

**4. Hardware utilizado.** - Teniendo en cuenta las funciones para las que fueron diseñadas las unidades nombradas, se define implementar la UC en un módulo Raspberry Pi 4, mientras que tanto las UCD como los NM son placas electrónicas diseñadas y ensambladas por los autores. Además, se utilizaron sensores de tipo Arduino y distintos tipos de actuadores.

**4.1 Unidad Central.** - La función principal de la UC es recibir toda la información del monitoreo y el control de las demás unidades. Además, ejecuta el software *Thingsboard*, que implementa la interfaz de usuario, procesa la información recibida, maneja la base de datos y permite el acceso remoto. La UC también cuenta con un *border-router*, que posibilita la comunicación de redes con tecnologías de capa física diferentes, dedicado a comunicar la red inalámbrica interna con la red global de Internet. Por otro lado, en la UC se ejecutan *scripts* de Python, que cumplen funciones auxiliares en la arquitectura de comunicación de este sistema. Finalmente, para que el sistema pueda ser accesible desde cualquier punto, la UC se comunica con un *router* vía Wifi, habilitando la llegada a la red de internet.

Estas funciones requieren cierta capacidad de procesamiento y de memoria, por lo que la unidad es implementada en una computadora de placa simple Raspberry Pi 4.

**4.2 Unidad de Control Distribuido.** - Las UCD realizan el monitoreo y el control de las variables. Se encargan de solicitar medidas a los sensores conectados a ellas, además de realizar cálculos de control y manejar los actuadores. A su vez, las UCD se comunican tanto con la UC como con los NM de forma inalámbrica.

Debido a la especificidad de las funciones de estas unidades, se diseñó especialmente un modelo de placas electrónicas. Las placas se basan en módulos CC2650MODA de Texas Instruments, que consisten en un SoC con un procesador, una radio compatible con el estándar IEEE 802.15.4, memoria RAM y FLASH, además de varios periféricos. Las placas cuentan con un circuito de alimentación en 24 V<sub>DC</sub>, con reguladores a 5 V<sub>DC</sub> y 3,3 V<sub>DC</sub>. Completan el diseño cuatro relés DPDT, con sus componentes auxiliares, y varias borneras atornillables para acceder tanto a los IO del SoC, como a la alimentación (de 5 V<sub>DC</sub> y de 3,3 V<sub>DC</sub>).

En la Figura V se presenta el diseño esquemático de la placa.

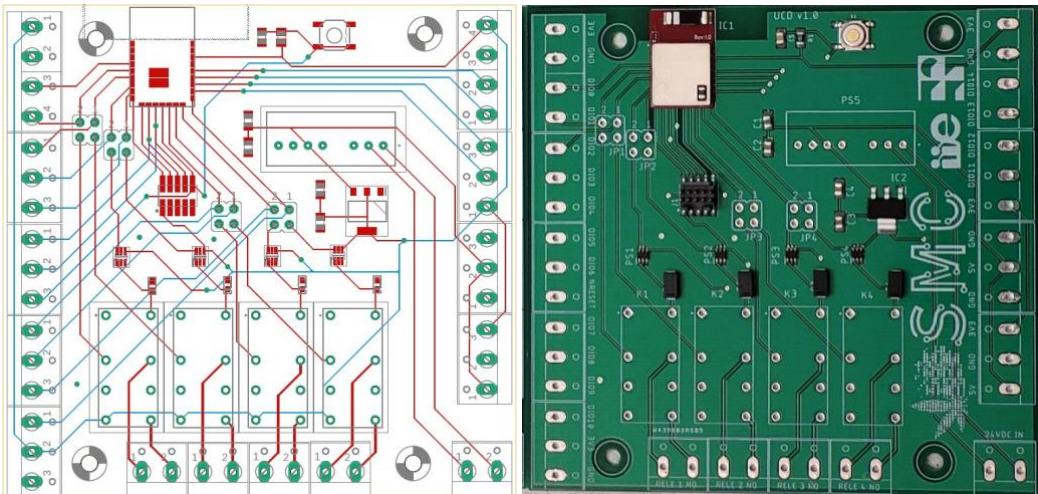


Figura V.- Layout de las UCD.

**4.4 Nodo Maceta.** - Los NM, si bien cumplen funciones similares a las UCD, tienen un diseño de placa más simplificado. Estas unidades se encargan de tomar medidas de los sensores de la maceta (temperatura y humedad del suelo) y de enviar dicha información a la UC y algunas UCD. Dada la reducida cantidad de funciones, y para obtener un diseño más ergonómico y de menor tamaño, las placas cuentan con una cantidad reducida de borneras atornillables, manteniendo el SoC pero accediendo a menor cantidad de IO. Los NM son alimentados por batería, por lo que cuentan con un circuito de regulación de tensión, un circuito de carga por USB y un *slot* para batería de tipo 18650. Además, se agregaron resistencias de *pull-up*, previendo futuras conexiones por I<sup>2</sup>C. Estas placas no cuentan con relés, dado que no operan actuadores. En la Figura VI se presenta el diseño esquemático de la placa.

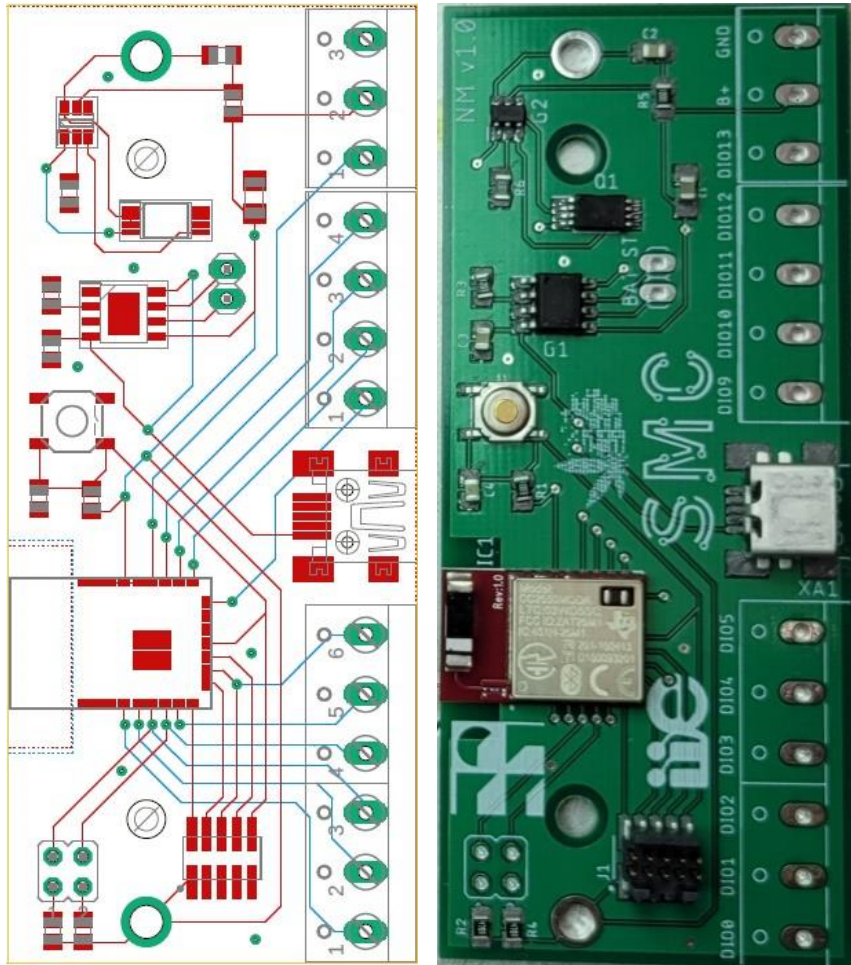


Figura VI.- Layout de los NM.

**4.5 Layout.** - La UC es instalada en la sala central de la planta productiva, dado que no necesita una cercanía física con el cultivo, la humedad ambiente es menor y cuenta con mejor conectividad con el *router* WiFi.

Las UCD son instaladas en cada una de las cuatro salas relativas al proceso productivo: sala de crecimiento vegetativo, sala de floración, sala de secado y sala de riego. En el caso de la sala de riego, se instalan dos UCD debido a la cantidad de actuadores que deben manejarse.

Los NM fueron diseñados para ser instalados de forma inalámbrica en las macetas de la plantación. Sin embargo, como prueba de concepto, se desarrollaron dos unidades de este tipo, siendo ambas instaladas en la sala de floración.

En la Figura VII se ilustra la disposición de las diferentes unidades en la planta productiva donde fue instalado el sistema.

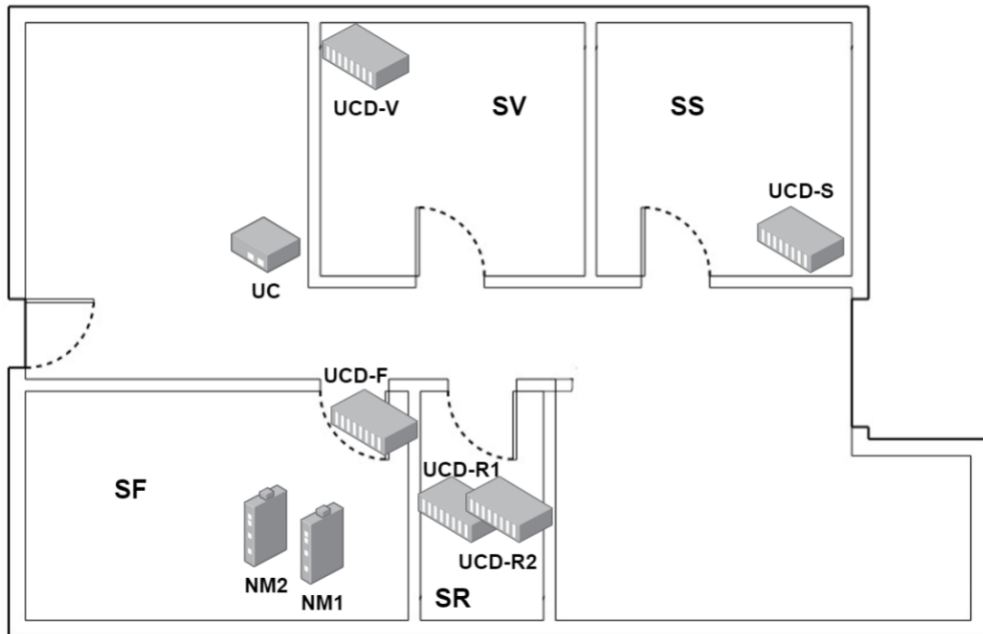


Figura VII.- Distribución del hardware principal en la planta.

**5. Red de comunicación.** - El sistema implementa una WSN (Wireless Sensor Network, red de sensores inalámbricos) interna, utilizando nodos de recursos limitados. Esta red se forma con las UCD, NM y el *border-router* de la UC. El *stack* utilizado está basado en 6LoWPAN, con protocolo CoAP para la Capa de Aplicación [11], además de ContikiNG como OS para estos dispositivos [10]. En la Figura VIII, se ilustra el *stack* en la red, desde la adquisición de un valor por parte de la UCD o NM, hasta la visualización de ese dato en un cliente web.



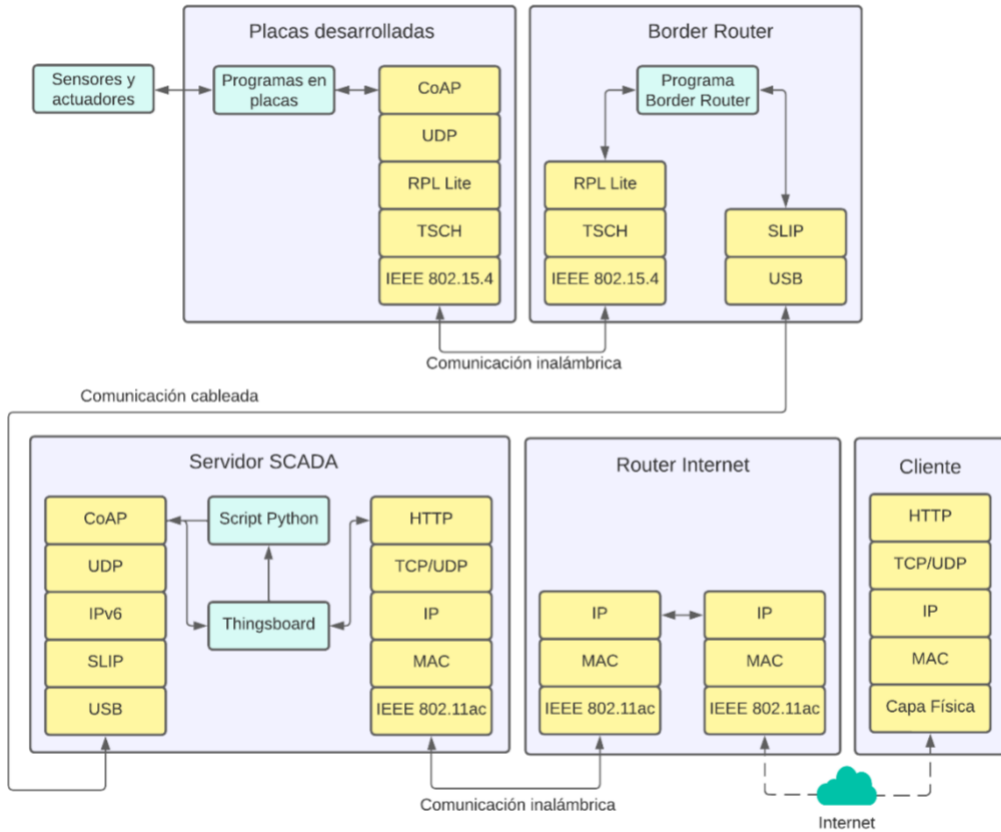


Figura VIII.- Stack de protocolos.

El software SCADA (Thingsboard) soporta CoAP como servidor. Las UCD implementan un servidor y cliente CoAP, para poder comunicarse con el software SCADA y entre ellos. Los NM solo operan como cliente CoAP.

El SCADA envía un mensaje individual a la UCD correspondiente, por cada comando o parámetro configurable y por cada variable monitoreada (cada vez que se actualiza la página web). A su vez, para poder enviar ese dato, el dispositivo receptor debe suscribirse al servidor, de acuerdo con el funcionamiento de CoAP Observe [12] (ya que Thingsboard es servidor CoAP). Para prevenir la posibilidad de que Thingsboard se olvide el dispositivo suscrito al recurso y para disminuir el número de mensajes entre el SCADA y los dispositivos, se implementaron dos scripts en Python. Estos scripts trabajan entre la comunicación que parte del SCADA hacia los dispositivos, de forma tal que, los mensajes de salida desde Thingsboard hacia las placas pasan por el script y se dirigen a las UCD correspondientes, mientras que, los mensajes de suscripción a recursos y consultas de valores desde Thingsboard hacia las placas son contestados por el script, por lo que no llegan a la red inalámbrica. Con esta solución se logró un sistema más estable y robusto, aumentando la disponibilidad de la red y disminuyendo el consumo energético. En la Figura IX, se indica el flujo de mensajes que se intercambian en el sistema.

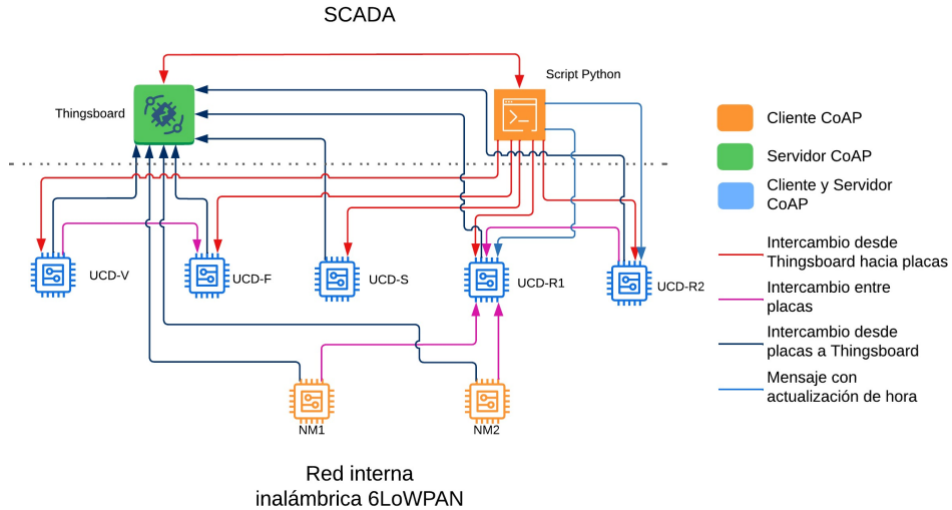


Figura IX.- Clientes y servidores CoAP.

A nivel de capa de aplicación, se utilizan mensajes con reconocimiento, por lo tanto, en caso de perderse algún paquete, se retransmitirá 4 veces o hasta recibir el reconocimiento por parte del receptor del mensaje.

**6. Monitoreo.** - La función de monitoreo se centra en las condiciones ambientales de las áreas de producción. De los nueve parámetros principales que influyen sobre el crecimiento de las plantas, este sistema monitorea seis: luz artificial, humedad y temperatura del ambiente, humedad y temperatura del suelo y CO<sub>2</sub>.

Toda la información de monitoreo es recuperada por los controladores (UCD y NM), tomando lecturas periódicas de los múltiples sensores. Esta información es enviada a la UC, donde es procesada por el SCADA para construir y presentar los *dashboards*.

Por otra parte, la información relativa a la humedad del suelo es enviada desde el NM hacia la UCD dedicada al control de riego. A su vez, la temperatura exterior es tomada por una UCD y enviada a otra, para que ambas puedan calcular los lazos de control de temperatura de las habitaciones correspondientes.

**6.1 Sensores.** - Dado que la calidad de las lecturas no fue una prioridad en este proyecto, se usaron sensores Arduino, teniendo en cuenta que son básicos y económicos.

Para la detección del estado de la luz artificial se utilizaron sensores de tipo LDR, de salida digital, que cambian su estado de acuerdo a la comparación de la cantidad de luz incidida con cierto umbral, permitiendo así una indicación de tipo On/Off.

En los casos de humedad y temperatura ambiente, se elige el sensor DHT-11 dado que mide ambas variables. La salida de este sensor es mediante un protocolo serial de propietario, similar al protocolo *OneWire*.

Las variables del suelo (humedad y temperatura), son manejadas por los NM. Para el caso de la humedad, se realiza un ensayo comparativo para evaluar sensores capacitivos y resistivos, encontrando que los capacitivos cuentan con un mejor rendimiento. Se utilizó el sensor SEN0193 de DFRobot, de salida analógica. La temperatura del suelo se mide con una sonda basada en el integrado DS18B20. Esta sonda es impermeable e introducible en la tierra, por lo que resulta conveniente para su función. El integrado utiliza el protocolo *OneWire* para comunicarse con el

NM.

Finalmente, el CO<sub>2</sub> es medido por un módulo que utiliza el sensor de medida directa MH-Z14, con tecnología NDIR. Este módulo tiene múltiples salidas, pudiendo elegir PWM, UART y analógicas, siendo éstas las utilizadas en el sistema.

Para los lazos de control también se usan algunos sensores extra. Un sensor a destacar es el de nivel de pH. Se buscó un sensor que pueda sumergirse de forma permanente en el agua, con una lectura rápida, encontrándose la sonda SEN0169-V2 de DFRobot, que cuenta con grado industrial. También incluidos en el circuito de agua, se utilizan los sensores YF-S201 para medir el caudal de agua que entra y sale del tanque reservorio. A su vez, para evitar desbordes de agua en dicho tanque, se utiliza un sensor de tipo boya, que cuenta con contactos secos NC y NO, activables de acuerdo al ángulo generado por el componente flotante y el contrapeso. Estos contactos secos son conectados a un relé repetidor que indica al UCD correspondiente el llenado del tanque, y a su vez desactiva la electroválvula de llenado. De esta forma, se tiene un circuito de seguridad por controlador, respaldado por un enclavamiento.

**6.2 Dashboards.-** Thingsboard se instaló en la UC, donde también se utiliza una base de datos en PostgreSQL para guardar los datos adquiridos. Esta plataforma soporta algunos de los protocolos más usados en la industria IoT (MQTT, CoAP, HTTP, entre otros), usando mensajes del tipo JSON. El protocolo que se decidió utilizar es CoAP ya que es posible integrar de forma directa a la red inalámbrica 6LoWPAN.

En Thingsboard, se puede utilizar la funcionalidad de las rule chains (reglas de cadenas) para el procesamiento de datos. Esta característica opera como un proceso de toma de decisiones, en el cual cada mensaje es filtrado, modificado o utilizado para realizar una acción específica. En el sistema, se desarrolla una regla de cadena que tiene la capacidad de filtrar diferentes tipos de mensajes, detectar datos incorrectos, registrar errores, verificar los set-points de las alarmas, enviar notificaciones de alarmas y escalar los valores para mostrarlos correctamente.

La información es mostrada en paneles y *dashboards*. Los paneles dan la posibilidad de ubicar en una página dichas gráficas, además de botones, interruptores, indicadores, entre otros, que proveen distintas funcionalidades para el usuario, como visualización de datos, control remoto de dispositivos y manejo de alarmas. Para este sistema, se desarrollaron un panel general, otro panel para cada una de las cuatro áreas productivas y un panel de manejo interno. La Figura X muestra un ejemplo de panel.



Figura X.- Panel Sala vegetativa.

Aunque el servidor SCADA (Thingsboard) se ejecuta en la UC, se puede acceder remotamente a los paneles mediante cualquier navegador de internet. Un servicio No-IP [5] se usa para publicar la página web local del SCADA. Esta unidad también cuenta con acceso remoto SSH y VNC, para soporte.

**7. Control.** - El sistema de control desarrolla cuatro lazos de control para las variables más importantes del proceso productivo. Algunos parámetros, como los *set-points*, son configurados por el usuario mediante el SCADA.

**7.1 Humedad de suelo.**- En primer lugar, se tiene un lazo de control asociado a la humedad del suelo, que administra el riego de las plantas. Los NM se encargan de recuperar información de la humedad del suelo del sensor para luego enviarla a la UCD a cargo de este lazo de control y a la UC. Para administrar el riego de las plantas, el sistema lleva a cabo un lazo cerrado Proporcional-Integral (PI) de tiempo discreto. Una vez al día, la UCD verifica el nivel de humedad y lo compara con un umbral determinado. Si el nivel de humedad es más bajo que el umbral, el sistema calcula la cantidad de agua (es decir, el tiempo de riego a un caudal fijo) para lograr el nivel óptimo de humedad. A su vez, para minimizar errores y efectos de sensor, un mínimo de 300 mL de agua es administrado a la planta a diario, independientemente del nivel de humedad. El componente proporcional del lazo es usado para convertir la diferencia de humedad en términos de volumen de agua. El componente integral se actualiza a diario, elaborado mediante una suma de errores entre el *set-point* y el nivel de humedad logrado luego de la homogenización de agua.

**7.2 Nivel de pH.** - El sistema también administra los niveles de pH antes de regar, llevando a cabo un lazo cerrado de tipo Proporcional. Una vez al día, el sistema realiza un ciclo de medición de pH, cálculo y dosificación del reductor de pH. La UCD calcula la cantidad de ácido fosfórico a suministrar, proporcional a la diferencia de pH entre la lectura y el *set-point* determinado. Luego de dosificar este químico, se activa el sistema de recirculación hidráulica para homogenizar el valor de pH del agua. Este proceso de regulación del pH se reinicia luego de unos minutos, finalizando cuando el valor de pH está dentro de un rango aceptable respecto al *set-point*.

**7.3 Temperatura ambiente.** - Otro lazo de control actúa sobre la temperatura ambiente de las dos habitaciones relacionadas al crecimiento de las plantas. Para imitar correctamente el ambiente natural, se recomienda establecer distintas temperaturas de ambiente, dependiendo de los períodos de luz (día o noche) y etapa de crecimiento (crecimiento vegetativo o floración). Estas habitaciones ya contaban con aire acondicionado, aunque no había otra manera de cambiar los *set-points* de temperatura sin ser manualmente, por lo que el sistema controla la temperatura de la habitación encendiendo y apagando los equipos cuando sea conveniente. Se define la operación teniendo en cuenta que, cuando las luces están encendidas, se convierten en la mayor fuente de calor, convirtiéndose en el factor más importante para el cambio de temperatura ambiente. Por otro lado, cuando las luces están apagadas, el factor más importante para el cambio de temperatura ambiente es la temperatura exterior, pudiendo influenciar tanto en el aumento como en la disminución de la temperatura ambiente. Por lo tanto, el sistema trabaja con varios umbrales, lecturas de temperatura (ambiente y exterior) y su influencia en el calentamiento del ambiente, para determinar si el equipo de aire acondicionado debería encenderse o apagarse.

**7.4 Humedad ambiente.** - El último lazo de control tiene lugar en la habitación de secado y refiere a la humedad ambiente. Al podarse las plantas, las ramas florecidas se cuelgan para ser secadas y cortadas. Este proceso requiere un nivel bajo de humedad ambiente. El sistema controla un dispositivo deshumidificador, encendiéndolo y apagándolo según la medida de humedad ambiente obtenida. El lazo de control establece un umbral con histéresis, así, si las lecturas sobrepasan el *set-point* determinado y su histéresis, el dispositivo se enciende, y viceversa. Con esta

configuración, se espera que la humedad ambiente oscile dentro de un rango determinado.

**8. Conclusiones.** - Se realizó el análisis de proceso productivo del Cannabis indoor. Como primer resultado se seleccionan las variables a ser monitoreadas para llevar un control eficiente de la producción. Como segundo paso, se seleccionan los lazos de control que simplifican la operación y que tienen un costo-beneficio aceptable para su implantación en una instalación de pequeño porte. El sistema fue desarrollado en el contexto del Proyecto de Fin de Carrera de Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería de la UdelaR. El proyecto abarcó el análisis, la propuesta de implementación y el desarrollo y ensayo de un primer prototipo.

Se obtuvo un sistema amplio, que involucra soluciones a varios posibles inconvenientes en una producción agrícola de tipo indoor. Se desarrolló una red inalámbrica IoT, compatible con el estándar IEEE 802.15.4 y el protocolo 6LoWPAN, solucionando problemas de compatibilidad entre los controladores y el SCADA y optimizaciones en el tráfico. Se diseñaron y ensamblaron por completo placas electrónicas para los controladores, funcionales en su primer diseño, pasando por un proceso previo intenso, con correcciones, ideas y contingencias. También se tuvo en cuenta al usuario final, agregando un software que permita el manejo de la información, con interfaces gráficas amigables y la opción de acceso remoto para visualización y comando.

## 9. Referencias

- [1] Presidencia de la República Oriental del Uruguay; Ley 19.172, 2013. Disponible Online (Consultado: 30/05/2023): [http://archivo.presidencia.gub.uy/sci/leyes/2013/12/cons\\_min\\_803.pdf](http://archivo.presidencia.gub.uy/sci/leyes/2013/12/cons_min_803.pdf)
- [2] Appolloni E. et al; Beyond vegetables: effects of indoor LED light on specialized metabolite biosynthesis in medicinal and aromatic plants, edible flowers, and microgreens, *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 2022. Vol 102(2): p. 472-487.
- [3] Palande, V., Zaheer, A. y George, K., Fully Automated Hydroponic System for Indoor Plant Growth, *Procedia Computer Science*, 2018. Vol. 129.
- [4] Pertwee, R. y Potter, D. J.; *Handbook of Cannabis*, Chapter 4, Cannabis Horticulture. 2014. Oxford University Press, Print ISBN-13: 9780199662685
- [5] Alonso, D., Menoni, C. y Saravia, F.; (2022.). Sistema de monitoreo y control de cultivo indoor de cannabis. Tesis de grado. Universidad de la República, Facultad de Ingeniería (Uruguay), 2022. Disponible Online (Consultado: 3/06/2023): <https://hdl.handle.net/20.500.12008/35421>
- [6] Sociedad Española de Investigación sobre Cannabinoides, Guía Básica sobre los Cannabinoides. Universidad Complutense de Madrid, 2002. Disponible Online (Consultado: 3/06/2023): <https://www.seic.es/wp-content/uploads/2013/10/guiab%C3%A1sicacannab.pdf>
- [7] Cervantes, J., *Marijuana Horticulture: The Indoor/Outdoor Medical Grower's Bible*, Van Patten Publishing, Vancouver, WA, 2006.
- [8] Jin, D., Jin, S. y Chen, J.; Cannabis Indoor Growing Conditions, Management Practices, and Post-Harvest Treatment: A Review. *American Journal of Plant Sciences*, 2019, Vol 10: p. 925-946
- [9] Adams, P., *Marijuana Indoor Growing*, Positive Publishers b.v.b.a, Amsterdam, The Netherlands, 2007.
- [10] Contiki-NG Community. Disponible Online (Consultado: 8/6/2023): <https://github.com/contiki-ng/contiki-ng/wiki>
- [11] Shelby, Z., Hartke, K., and C. Bormann., The Constrained Application Protocol (CoAP). RFC 7252, June 2014. Disponible Online (Consultado: 8/6/2023): <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7252>
- [12] Hartke, K., Observing Resources in the Constrained Application Protocol (CoAP). RFC 7641, September 2015. Disponible Online (Consultado: 8/6/2023): <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7641>

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

CM ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

DA ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

FS ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

NP ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

LS ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo.

# Evaluación de la probabilidad de falla de árboles urbanos usando tecnologías no destructivas

*Urban tree risk assessment using non-destructive technologies*

*Avaliação de risco de árvores urbanas usando tecnologias não destrutivas*

Ana Paula Coelho-Duarte <sup>1</sup>, Óscar Vallejos-Barra <sup>2</sup>, Mauricio Ponce-Donoso <sup>3</sup>

Recibido: 12/06/2023

Aceptado: 12/06/2023

**Resumen.** - Los árboles urbanos aportan servicios ecosistémicos de gran importancia para las ciudades. Para que estos servicios sean aprovechados es importante que los árboles estén en buen estado, minimizando el riesgo a las personas, bienes y actividades esenciales debido a la caída de ramas o árboles enteros. Su condición debe ser debidamente evaluada, favoreciendo su presencia en la ciudad con niveles aceptables de riesgo. El objetivo del trabajo fue comparar la valoración de la probabilidad de falla de árboles urbanos utilizando tres niveles de evaluación del riesgo, estudiando la combinación de la evaluación visual con resultados obtenidos a partir de tecnologías no destructivas. Fueron evaluados 32 árboles de los géneros *Eucalyptus* y *Tipuana*, ubicados en un parque urbano de Montevideo, Uruguay. Dos evaluadores, con experiencia en evaluación visual y en equipamientos no destructivos, utilizaron tres niveles de evaluación según la norma ANSI A300. Para los niveles 1 y 2 se utilizaron descriptores basados en el método ISA/BMP. Para el nivel 3 fueron realizadas evaluaciones con un penetrógrafo y un tomógrafo acústico. Las evaluaciones visuales básicas y los análisis de los equipamientos fueron vinculantes, especialmente en árboles que tenían alguna evidencia de problemas estructurales en el tronco.

**Palabras clave:** arboricultura, clasificación del riesgo de los árboles, árboles urbanos, árbol peligroso, bosque urbano.

**Summary.** - *Urban trees provide ecosystem services of great importance to the city. To take advantage of these services, it is important that the trees are in good condition, minimizing the risk to people, goods, and essential activities due to the fall of branches or entire trees. Therefore, their condition must be duly evaluated to favor their presence in the city with acceptable levels of risk. The main goal of this research was to compare assessments of likelihood of failure of urban trees using three levels of risk assessment, as well as to study the combination of visual assessment with results obtained from non-destructive technologies. Thirty-two trees of the genera Eucalyptus and Tipuana, located in an urban park in Montevideo, Uruguay, were evaluated. Two assessors with experience in visual assessment and non-destructive equipment used three levels of assessment according to ANSI A300. For levels 1 and 2, descriptors based on the ISA/BMP method were used.*

---

<sup>1</sup>Doctora en Ciencias Agrarias. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, paula.coelho@fagro.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9914-0032>

<sup>2</sup>Doctor en Ciencias Forestales. o.vallejos.barra@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0155-0835>

<sup>3</sup>Doctor en Ciencias Forestales. Sociedad Chilena de Arboricultura, mauricio.ponce.donoso@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9949-2057>



*For level 3, evaluations were performed with a drilling resistance equipment and an acoustic tomograph. The basic visual assessments and non-destructive analyses could be linked, especially in trees that had some evidence of structural problems in stems.*

**Keywords:** arboriculture; tree risk rating; urban trees; hazardous tree; urban forest.

**Resumo.** - As árvores urbanas fornecem serviços ecossistêmicos de grande importância para a cidade. Para usufruir destes serviços, é importante que as árvores se encontrem em bom estado, minimizando o risco para pessoas, bens e atividades essenciais devido à queda de ramos ou árvores inteiras. Portanto, sua condição deve ser devidamente avaliada para favorecer sua presença na cidade com níveis aceitáveis de risco. O principal objetivo desta pesquisa foi comparar avaliações de probabilidade de falha de árvores urbanas usando três níveis de avaliação de risco, bem como estudar a combinação de avaliação visual com resultados obtidos de tecnologias não destrutivas. Foram avaliadas 32 árvores dos gêneros *Eucalyptus* e *Tipuana*, localizadas em um parque urbano em Montevideú, Uruguai. Dois avaliadores com experiência em avaliação visual e equipamentos não destrutivos utilizaram três níveis de avaliação de acordo com ANSI A300. Para os níveis 1 e 2, foram utilizados descritores baseados no método ISA/BMP. Para o nível 3, as avaliações foram realizadas com um equipamento de resistência à perfuração e um tomógrafo acústico. As avaliações visuais básicas e as análises não destrutivas puderam ser vinculadas, principalmente em árvores que apresentavam alguma evidência de problemas estruturais nos fustes.

**Palavras-chave:** arboricultura; classificação de risco das árvores; árvores urbanas; árvore perigosa; floresta urbana.

**1. Introducción.** - Los árboles urbanos aportan servicios ecosistémicos de gran importancia en la ciudad [1; 2; 3; 4; 5]. Sin embargo, es importante que los árboles estén en buenas condiciones para que su riesgo sea reducido [6; 7]. En caso contrario, la caída de ramas o árboles enteros pueden llegar a causar daños a personas, bienes materiales o cortes de servicios esenciales [8]. Dado que eliminar el riesgo total del arbolado urbano es una actividad económica y técnicamente inviable, evaluar la condición del árbol tiene como objetivo reconocer y reducir los potenciales riesgos, conservando una cobertura deseable [9; 10; 8].

La Norma ANSI A300 [11] proporciona directrices para la evaluación del riesgo. Según esta norma, los métodos pueden ser divididos en tres niveles de aplicabilidad: nivel 1 - visual limitado, donde la evaluación puede ser realizada desde un móvil en movimiento; nivel 2 - visual básica, cuyo uso se apoya en un formulario y herramientas sencillas, como martillo de goma, binocular, entre otros; y el nivel 3 - evaluación avanzada, donde se incorporan equipos avanzados para detectar descomposición y calcular la resistencia remanente, como son tomógrafo sónico, penetrógrafo o radar de suelo.

Los métodos visuales plantean una incertidumbre vinculada a los niveles 1 y 2, que se relaciona a diversos factores, como la experiencia y el conocimiento que el evaluador tiene respecto de las características de la especie a evaluar. En algunos casos los defectos son muy visibles, como las grietas o la presencia de cuerpos fructíferos [12], pero gran parte de ellos no son fácilmente identificables, lo que obliga muchas veces a realizar suposiciones. Para disminuir esta incertidumbre es que en algunos casos se recomienda la evaluación de nivel 3, que incorpora el uso complementario de instrumentos de análisis, llamados métodos no destructivos [13]. El estudio que integra estos métodos e instrumentos es de reciente data [14].

Actualmente han sido estudiados y adaptados al ambiente urbano diversos tipos de instrumentos como penetrógrafos, detectores ultrasónicos, medidores de conductividad eléctrica y radares [15; 16; 17; 18; 19]. Estos métodos no destructivos son usados para la evaluación de la condición interna de troncos y ramas, y la distribución de raíces. Si bien son instrumentos costosos, proporcionan buena información y deberían ser utilizados de forma complementaria a la evaluación visual del riesgo [20; 21].

Un estudio realizado en Estados Unidos [22] compara los tres niveles de evaluación asociada a la probabilidad de falla, realizado en cinco árboles por 70 evaluadores, considerando la Norma ANSI A300 [11]; encuentran que las medias de valoración a través del método de evaluación visual limitado (nivel 1) son menores que para los métodos visual básico (nivel 2) y avanzado (nivel 3), mientras que la diferencia entre estos últimos dos es menos pronunciada. Al respecto, concluyen que ninguno de los niveles de evaluación reduce las diferencias entre evaluadores.

En las últimas décadas diversos estudios han sido realizados con el objetivo de evaluar la efectividad de la utilización de diferentes tecnologías para detección de pudriciones en árboles urbanos. Autores investigan sobre la aplicación de tomógrafo de impedancia eléctrica, ultrasonido, georadar y penetrógrafo para la detección de pudrición en árboles de *Platanus hybrida* [23]; encuentran que el ultrasonido es una tecnología efectiva para este tipo de evaluación, siendo capaz de ubicar y estimar el tamaño de las pudriciones. Otros investigadores muestran resultados de evaluaciones realizadas con tecnologías no destructivas y con evaluaciones visuales [18; 20]; en ambos estudios se considera que la combinación de la evaluación visual con los resultados del tomógrafo acústico y del penetrógrafo es capaz de estimar y ubicar áreas con deterioro.

Por otro lado, en una comparación de dos modelos de tomógrafos acústicos, otro estudio señala que la mayor fuente de error es la posición de los sensores, dado que afecta la velocidad estimada de la onda de tensión, así como la forma del tomograma y el tamaño del defecto [24]. Por consiguiente, para producir tomogramas aceptables y repetibles de árboles con formas complejas,

es esencial medir la posición de los sensores con precisión.

La presente investigación tuvo como objetivo comparar la valoración de la probabilidad de falla de árboles urbanos utilizando tres niveles de evaluación del riesgo, así como estudiar la combinación de la evaluación visual con resultados obtenidos a partir de un tomógrafo sónico y un penetrógrafo.

## 2. Materiales y métodos. –

**2.1 Área de estudio.** - El trabajo de campo fue realizado en el Parque José Batlle y Ordóñez, Montevideo, Uruguay (34°53'45"S y 56° 9'33"O). La ciudad se ubica a 136 msnm y posee una población de 1,3 millones de habitantes, representando casi el 50% del total de la población del país. Posee un clima subtropical húmedo de Köppen-Geiger (Cfa) con una temperatura media anual de 16,7°C y una precipitación anual de 1.100 mm; el invierno es húmedo, ventoso y nublado, con ocurrencia de temporales y tormentas; mientras que el verano es cálido y húmedo, con poco viento [25].

**2.2 Árboles, evaluadores y métodos.** - Fueron seleccionados 16 ejemplares adultos del género *Eucalyptus* y 16 de *Tipuana tipu*, ampliamente presentes en el parque, que se alinean en aceras, áreas internas y senderos. La mayoría de los árboles seleccionados estaban ubicados donde prevalecía el movimiento de vehículos y peatones, aunque también se seleccionaron algunos ubicados en áreas al interior del parque, que presenta un uso ocasional a intermitente. La selección consideró las distintas situaciones vinculadas a los componentes de probabilidad de falla, probabilidad de impacto y consecuencia, incorporando árboles en todos los posibles niveles de riesgo.

En los 32 árboles fueron aplicados tres niveles de evaluación del riesgo —nivel 1, nivel 2 y nivel 3—. Las evaluaciones fueron llevadas a cabo entre los meses de octubre y diciembre de 2018, realizadas de forma individual por dos profesionales con experiencia en evaluaciones de riesgo del arbolado urbano, tanto visuales como a través de las tecnologías no destructivas. Para el nivel 1 los evaluadores observaron por aproximadamente 5 minutos cada árbol y marcaron la opción entre las categorías de probabilidad de falla que mejor representaba cada situación, basadas en las categorías “improbable, posible, probable e inminente” descritas en el método “*Best Management Practices – Tree Risk Assessment*” – ISA BMP [26]. Para el nivel 2 también fue utilizado este método de evaluación visual, con las mismas categorías de probabilidad de falla, pero con una evaluación que requirió mayor tiempo. A fin de analizar la información sobre los daños potenciales que podrían causar la falla de los ejemplares evaluados, fue calculado el porcentaje de los defectos identificados y fue extraída la información del tamaño de la parte más probable de fallar.

Para el nivel 3 fueron realizadas evaluaciones con dos instrumentos no destructivos: el resistógrafo PD400-Series de IML® y el tomógrafo de impulso 2D (RINNTECH® ARBOTOM®). Para todos los árboles se ajustó el resistógrafo con las velocidades de 25 cm/minuto y 1.500 rotaciones/minuto, para penetración y rotación respectivamente, y se buscó mantener la horizontalidad del equipo (ángulo de entrada de 0°). Los instrumentos fueron posicionados únicamente en el tronco, de acuerdo con la presencia de defectos, y en algunos casos, se llevó a cabo más de una aplicación por árbol. Las evaluaciones con el resistógrafo fueron realizadas en la dirección de o entre los sensores del tomógrafo que presentaban alguna zona con posible deterioro identificado en la imagen del tomograma, y en la misma altura de la medición de éste. Al final de la aplicación instrumental, los evaluadores observaban las imágenes generadas por cada técnica y marcaban en una planilla la categoría de probabilidad de falla correspondiente (improbable, posible, probable e inminente). Para esta actividad fueron utilizadas las imágenes del software del resistógrafo y las

generadas en la aplicación de análisis mecánica del software del tomógrafo con el ajuste automático.

Finalmente, para el procesamiento estadístico las categorías cualitativas fueron transformadas en rangos numéricos de 1 a 4, donde 1 corresponde a la categoría más baja (improbable) y 4 a la más alta (inminente).

**2.3 Análisis estadístico.** - En el análisis estadístico se incluyeron 192 evaluaciones. Diferencias entre géneros, niveles de evaluación, evaluadores y la interacción entre éstos fueron testeadas utilizando análisis de varianza (ANOVA) a un nivel  $P < 0,01$ . Para el ANOVA se utilizó un modelo lineal mixto (MLMix), considerando como factor aleatorio el efecto “árbol”, evitando así problemas de falta de independencia y multicolinealidad, dado que todos los niveles fueron aplicados en los mismos árboles. Cuando la hipótesis nula fue rechazada, los promedios fueron comparados utilizando la prueba *Least Significant Difference* (LSD) de Fisher ( $\alpha = 0,01$ ). Los datos fueron analizados con la función *lmer* de la librería *lme4* de R, interconectado al *software* InfoStat versión 2020 [27]. Asimismo, para construir los gráficos se usó SigmaPlot versión 12.

Los datos del tomógrafo fueron procesados en el software ARBOTOM® a través de *Mechanic Graph*, que presenta las velocidades mínimas, medias y máximas de la propagación de la onda entre los sensores, y que indicaría la pérdida de resistencia mecánica de la parte en función de la forma del tronco, la ubicación y el porcentaje de la zona con decaimiento [28]. Se extrajo información con ajuste automático y manual; el uso del ajuste manual del software consistió en la exclusión de las velocidades detectadas como outliers en el gráfico de estadística del propio software y, a partir de ello, fueron seleccionadas las velocidades mínimas y máximas.

**3. Resultados y Discusión.** - No hubo diferencias significativas entre los géneros y entre los evaluadores, ni tampoco interacciones entre las variables. A su vez, hubo diferencias significativas ( $P < 0,01$ ) entre los niveles de evaluación (Figura 1).

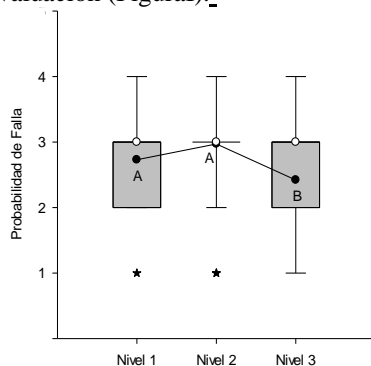


Figura 1. Diagrama de caja (barras) para la probabilidad de falla por nivel de evaluación ( $P < 0,01$ ). Media ajustada (puntos negros), medianas (círculos blancos) y valores atípicos (estrellas negras). Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas (LSD,  $P < 0,01$ ).

Las evaluaciones de nivel 1 y 2 no difirieron estadísticamente, lo que diferencia a lo encontrado por [22], donde encuentran menor promedio en la evaluación de nivel 1, siendo menor inclusive que la evaluación utilizando los equipamientos no destructivos. La diferencia entre los niveles 1 y 2 era esperada, debido a que durante una evaluación limitada, el evaluador no tiene la visión completa del árbol, como lo señalan estos autores. El resultado obtenido puede ser explicado por

la mayor presencia de defectos de fácil visualización en la copa, donde los evaluadores con mayor experiencia fueron capaces de identificar rápidamente los principales problemas. Se observó además que la evaluación de nivel 3, utilizando las tecnologías de diagnóstico, obtuvo un menor promedio que los niveles 1 y 2, pudiendo ser explicado porque en la mayoría de las evaluaciones visuales básicas la parte más probable de fallar fueron las ramas, mientras que la evaluación avanzada se focalizó en el tronco. Otros autores [22] encuentran que el uso del penetrógrafo (nivel 3) no se diferencia de la evaluación visual básica (nivel 2); a su vez, el tomógrafo —que también correspondiente a un nivel 3 de evaluación— obtiene un menor promedio que el nivel 2, resultado similar a lo encontrado en esta tesis.

En general, un cambio del nivel de evaluación de limitado a básico conlleva un aumento en el tiempo de evaluación de 15 a 20 minutos [29], que es más que el doble del tiempo, cuestión que en esta investigación sucedió, pero sin que cambiara la valoración de la probabilidad de falla obtenida. La diferencia principal entre estas dos formas de evaluar el componente sería que, en el nivel 2, el evaluador indica los problemas y los respectivos manejos necesarios para reducir la probabilidad de falla. Esto podría indicar que, en la práctica, sería viable generar un método de nivel 1 con un formulario más robusto, pero de rápida evaluación, para ser utilizado en grandes poblaciones arbóreas —como son los parques urbanos o periurbanos— a fin de detectar y reportar defectos que evidencian situaciones peligrosas, para su posterior manejo.

Cuando se compararon los evaluadores en un mismo nivel de evaluación, no hubo diferencia significativa entre ellos considerando  $P < 0,01$ , pero lo hubo en un nivel de significancia de 0,05 para los niveles 1 y 2 (Figura II).

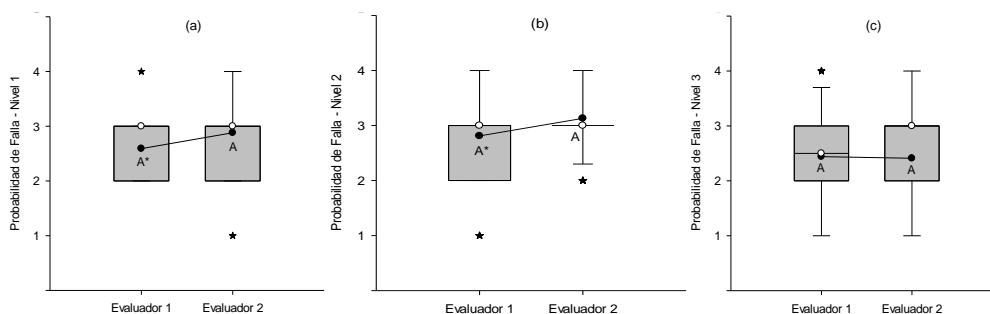


Figura II. Diagrama de caja (barras) para la probabilidad de falla por evaluador para cada nivel de evaluación ( $P < 0,01$ ): (a) Nivel 1, (b) Nivel 2, (c) Nivel 3. Media ajustada (puntos negros), medianas (círculos blancos) y valores atípicos (estrellas negras). Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas en las medias determinadas con una prueba de LSD Fisher ( $P < 0,01$ ) y el \* representa diferencia significativa con una prueba de LSD Fisher ( $P < 0,05$ ).

Fue posible observar una tendencia en la reducción de las diferencias entre los evaluadores al aumentar el nivel de evaluación con la utilización de los instrumentos. En el trabajo de [22] los autores encuentran una mayor consistencia tanto entre los niveles de evaluación como entre los evaluadores en un árbol sin indicadores externos de pudrición en el tronco, lo que podría explicar los resultados encontrados en la presente investigación, dado que el tronco fue pocas veces considerado como la parte más probable de fallar (solamente en tres de 32 árboles).

Con respecto al análisis de las partes del árbol más probable de fallar, considerado en el nivel 2, se realizaron 143 evaluaciones, de estas 91,6% eran ramas (secundarias y estructurales), 5,6% tronco y 2,8% raíz. Solamente en tres árboles (IDs 06, 11 y 16) el tronco fue evaluado como la parte más probable de fallar, todos del género *Eucalyptus*. Las evaluaciones de raíz, como parte más probable

de fallar, fueron consideradas en otros tres árboles (IDs 01, 02 y 17), dos *Eucalyptus* y una *Tipuana*; mientras que la probabilidad de falla en ramas se analizó para todos los árboles.

El reducido número de árboles en que el análisis del tronco fue considerado en las evaluaciones de nivel 2 (9%) fue similar al porcentaje identificado por [18], donde el 7% de los 147 árboles evaluados visualmente tienen identificados algún defecto estructural en el tronco.

De las evaluaciones con el tomógrafo, se observó que hay diferencias significativas entre los géneros en las velocidades reportadas, con excepción de la velocidad mínima, para ambos ajustes (Cuadros I y II y Figura III), siendo mayores las velocidades en los *Eucalyptus*.

Velocidad	Género	
	<i>Eucalyptus</i>	<i>Tipuana</i>
Mínima	894,63 ± 227,58 A	864,19 ± 146,47 A
Media	1.822,44 ± 298,35 A	1.514,81 ± 149,45 B
Máxima	2.750,88 ± 462,39 A	2.165,88 ± 333,67 B

Tabla I. Valores promedios de velocidades (m/s) obtenidos del tomógrafo con ajuste automático, por género. Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los géneros ( $P < 0,05$ ).

Velocidad	Género	
	<i>Eucalyptus</i>	<i>Tipuana</i>
Mínima	537,81 ± 98,69 A	521,94 ± 31,64 A
Media	1.266,06 ± 165,36 A	1.108,94 ± 105,71 B
Máxima	1.994,63 ± 269,54 A	1.696,38 ± 212,70 B

Tabla II. Valores promedios de velocidades (m/s) obtenidos del tomógrafo con ajuste manual, por género. Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los géneros ( $P < 0,05$ ).

Al realizar el ajuste manual se observó una reducción de las velocidades, mientras la tendencia entre las especies permanece en ambos tipos de ajuste (Figura III).

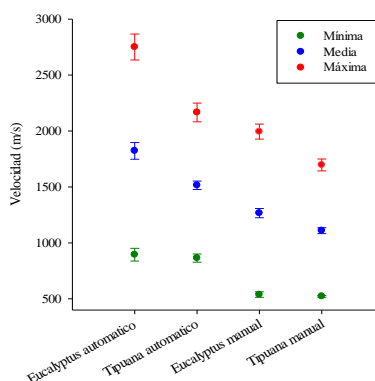


Figura III. Gráfico de dispersión (media y error estándar) para las velocidades mínima, media y máxima por género y tipo de ajuste.

Las mayores velocidades medias y máximas de los tomogramas de los eucaliptos estarían principalmente relacionadas a la mayor densidad de la madera del grupo de especies de este género que fueron evaluadas, que van desde los 625 kg/m<sup>3</sup> hasta los 1.220 kg/m<sup>3</sup> [30], en comparación con la de tipuana, que varía entre 670 a 750 kg/m<sup>3</sup> [31]. La velocidad mínima promedio detectada para el género *Tipuana* con ajuste manual del software fue similar al encontrado por [32], pero las velocidades media y máxima encontradas por el mismo autor son más bajas, lo que indicaría una mejor condición interna del tronco de los árboles encontrados en el Parque José Batlle y Ordóñez, coincidiendo que para ningún árbol de este género el tronco fue considerado como la parte más probable de fallar. Hay que destacar que la aplicación del software para ajustar el límite de velocidades influyó el resultado final del tomograma, que en el trabajo de [32] no se informa. En otra investigación [23], los autores encuentran para maderas de *Platanus hybrida*, con densidades promedio de madera sana entre 769 a 954 kg/m<sup>3</sup> y de madera con pudrición de 856 a 858 kg/m<sup>3</sup>, velocidades estimadas entre 600 y 1.200 m/s, que corresponderían a zonas con decaimiento, y entre 1.200 y mayor a 2.000 m/s para zonas con tejido sano. Este resultado fue similar a las velocidades encontradas con ajuste manual para el género *Eucalyptus*, que también tienen una densidad de tejido sano equivalente, indicando que este ajuste fue más adecuado comparativamente al automático.

Para el índice de pérdida mecánica también hubo diferencia significativa entre los géneros, siendo mayor la pérdida mecánica para el género *Eucalyptus* en ambos ajustes (Cuadro III y Figura IV).

Ajuste	Género	
	<i>Eucalyptus</i>	<i>Tipuana</i>
Automático	-32,31 ± 10,22 A	-22,00 ± 8,74 B
Manual	-8,63 ± 7,48 A	-3,81 ± 5,62 B

Cuadro III. Valores promedios del índice de pérdida mecánica vía tomografía por género (ajustes automático y manual). Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los géneros ( $P < 0,05$ ).

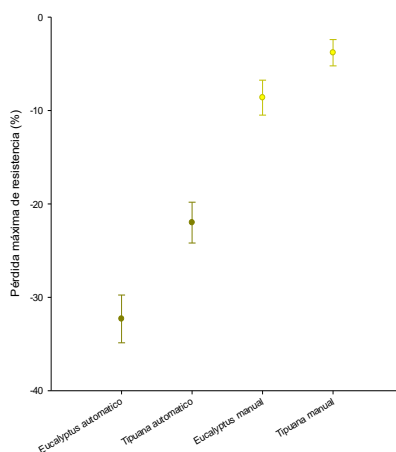


Figura IV. Gráfico de dispersión (media y error estándar) para la pérdida de resistencia máxima por género y tipo de ajuste.

Se observó que los eucaliptos tenían significativamente mayor pérdida de resistencia que las tipuanas, lo que estaría relacionado con la identificación del tronco de los árboles del género *Eucalyptus* como la parte más probable de fallar, en las evaluaciones visuales de nivel 2.

Utilizando el ajuste automático del tomógrafo, un 63% de los eucaliptos tuvieron un porcentaje de pérdida máxima de resistencia mayor al 30%, mientras que para las tipuanas fue de 19% (Cuadro IV). Se observó que hubo una reducción de las pérdidas de resistencia cuando se utilizó el ajuste manual, dado que todos los árboles presentaron pérdidas menor o igual a 30% y la mayoría menor a 10% (Cuadro IV).

Ajuste	Género	Pérdida Máxima de Resistencia (%)				
		0 a 10	11 a 20	21 a 30	31 a 40	≥ 41
Automático	<i>Eucalyptus</i>	0	13	25	37	25
	<i>Tipuana</i>	0	56	25	13	6
Manual	<i>Eucalyptus</i>	63	31	6	0	0
	<i>Tipuana</i>	94	0	6	0	0

Cuadro IV. Porcentaje de árboles por rango de pérdida de resistencia, por género y tipo de ajuste.

El número reducido de árboles identificados con defectos peligrosos en el tronco en el nivel 2 de evaluación puede estar vinculado con el bajo porcentaje de troncos con pérdida de resistencia mayor a 30%. Se observó que el ajuste manual sería más adecuado para corroborar las evaluaciones visuales, tal como lo recomendado en [28]. El ajuste automático tiende a aumentar significativamente el porcentaje de la pérdida máxima de resistencia, pudiendo llevar a decisión de eliminar árboles prematuramente.

De los árboles con evaluaciones donde el tronco es la parte más probable de fallar, esto es árboles ID 06, 11 y 16, las pérdidas de resistencia encontradas en el ajuste automático fueron 35%, 22% y 37%, respectivamente; mientras que cuando se utilizó el ajuste manual, los índices bajaron a 12%, 0% y 8%, respectivamente (Figura V). En este último ajuste, el resultado mostró que la pérdida de resistencia en la zona de medición del tronco fue baja, lo que podría indicar, en caso de no presentar otro defecto que actúe de forma sinérgica, que la probabilidad de fallar en esta zona específica también sería reducida.



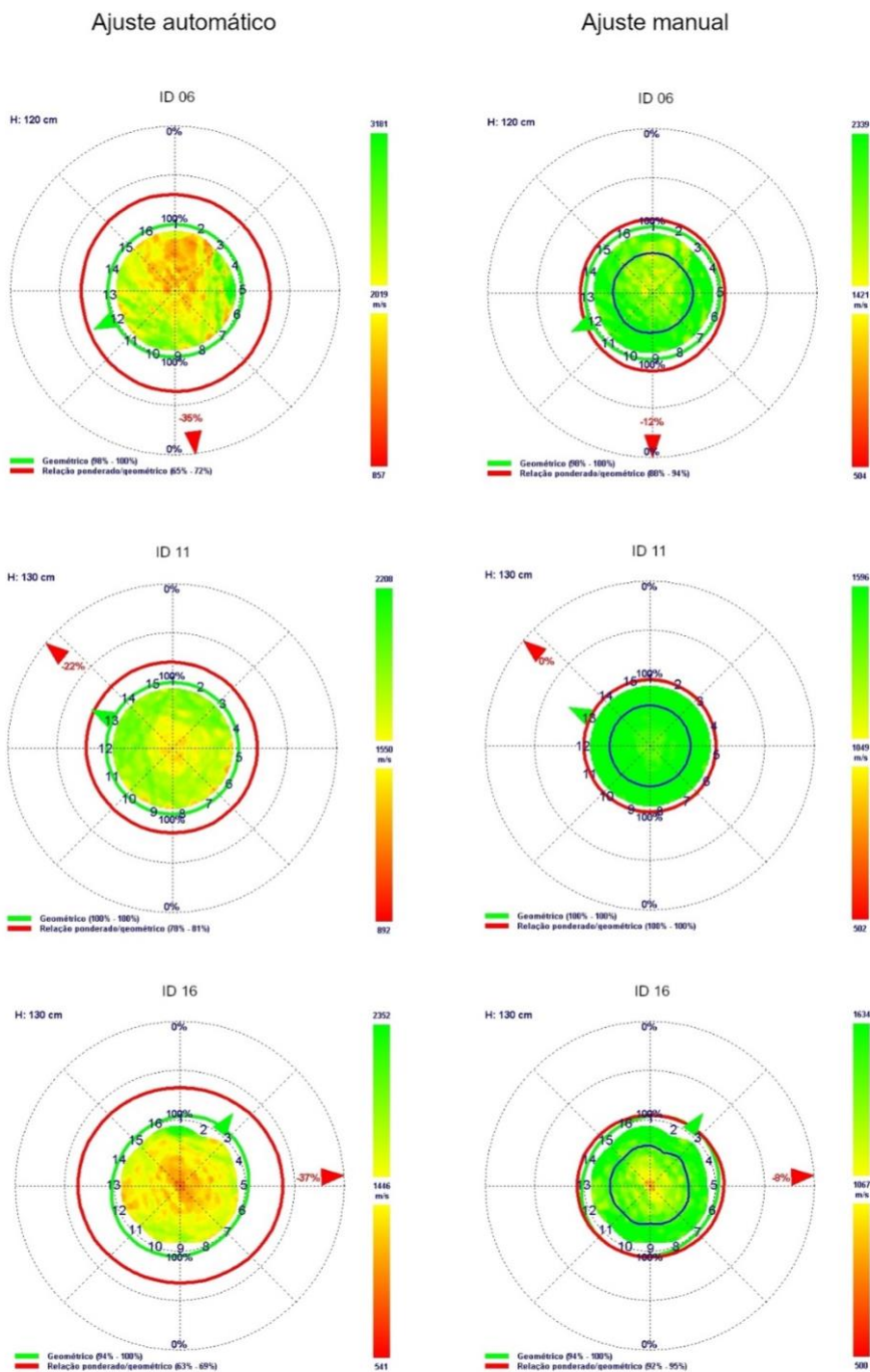


Figura V. Tomogramas de los árboles 06, 11 y 16 con ajuste automático y manual. La línea azul en los tomogramas con ajuste manual se posiciona a 1/3 del radio, de fuera hacia dentro.

En las Figuras VI, VII y VIII corresponden a los resistogramas de los árboles ID 06, 11 y 16, cuyos diámetros fueron 129, 94 y 102 cm, respectivamente. Su aplicación fue hecha considerando la ubicación del sensor del tomograma correspondiente. Se observa que la corteza de los eucaliptos mide alrededor de 2 cm.

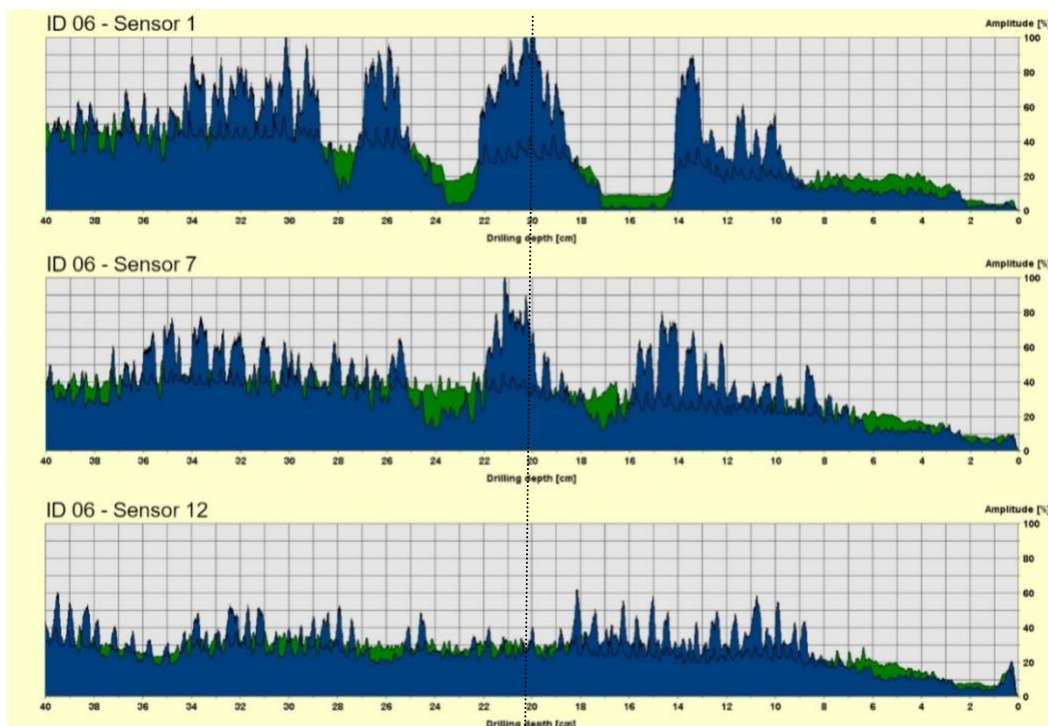


Figura VI. Resistogramas del árbol ID 06, a 1,20 m aplicado en tres diferentes posiciones. La línea negra punteada vertical indica  $1/3$  del radio del árbol, de fuera hacia dentro, calculado a partir del 0 del eje x del resistograma.

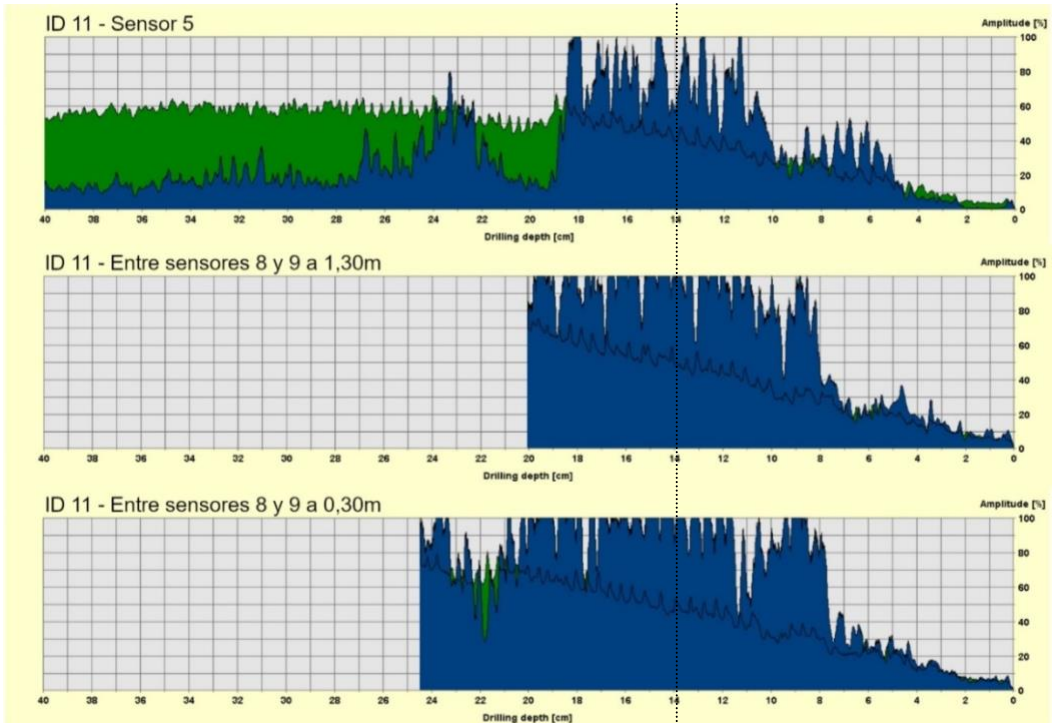


Figura VII. Resistogramas del árbol ID 11, a 1,30 m y a 0,30 m aplicado en tres diferentes posiciones. La línea negra punteada vertical indica  $1/3$  del radio del árbol, de fuera hacia dentro, calculado a partir del 0 del eje x del resistograma.

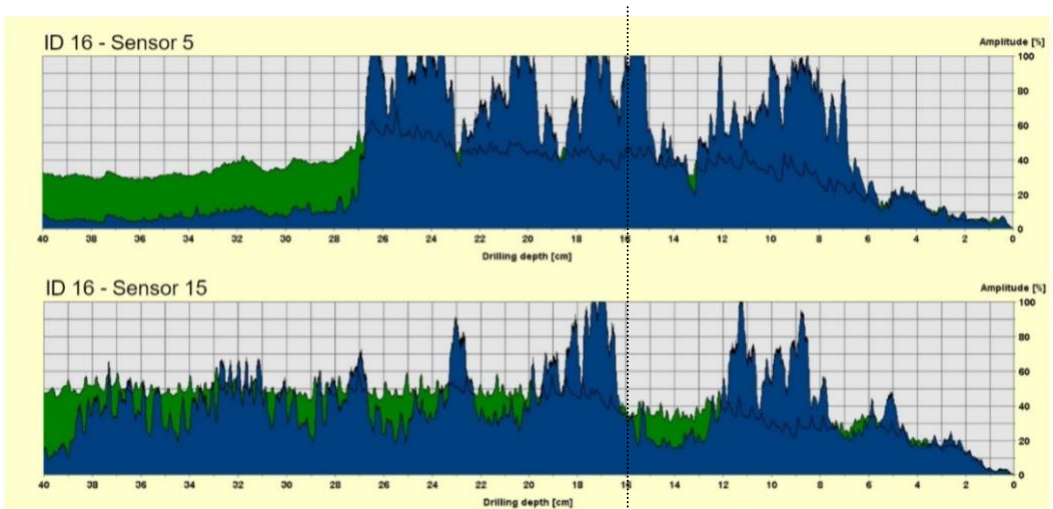


Figura VIII. Resistogramas del árbol ID 16, a 1,30 m aplicado en dos diferentes posiciones. La línea negra punteada vertical indica  $1/3$  del radio del árbol, de fuera hacia dentro, calculado a partir del 0 del eje x del resistograma.

Considerando los resistogramas, se visualizó que el árbol ID 11 (Figura VII) tuvo una alta resistencia a la penetración, principalmente en el primer tercio del radio del tronco, por lo que el equipo no logró finalizar la medición. A su vez, para el árbol ID 06 (Figura VI) se observó una zona de posible deterioro entre los 14 a 17 cm de penetración en la dirección del sensor 1, dentro del primer tercio del radio, lo que también fue observado en el respectivo tomograma con ajuste manual (Figura V); esta misma situación se observó en el caso del árbol ID 16 (Figura VIII), a partir de los 27 cm de penetración en la dirección del sensor 5 y de los 39 cm en la dirección del sensor 15, condición que se refrenda con el tomograma con ajuste manual (Figura V).

Los trabajos de [18] y [20] demuestran que la combinación de la evaluación visual, la tomografía acústica y el penetrógrafo es efectiva para la detección y medición de los defectos internos en los árboles. En el presente trabajo, haciendo esta combinación, dos de los 32 árboles evaluados presentaron algún compromiso en el tronco, que podría indicar un nivel de probabilidad de falla más elevado de esta parte. De hecho, en las evaluaciones de nivel 2 para el árbol ID 06, los evaluadores consideraron probable a inminente la probabilidad de falla del tronco, mientras que un evaluador lo consideró probable; a su vez para el árbol ID 11 fue considerada posible.

Al observar las imágenes de los tomogramas y resistogramas, correspondientes a la evaluación de nivel 3, en el 38% de los árboles los evaluadores marcaron la probabilidad de falla en una categoría más baja que la indicada en la evaluación de nivel 2 y, a su vez, mantuvieron la misma categoría en el 62%. Para ningún árbol la probabilidad de falla aumentó posterior a la evaluación de nivel 3. En este contexto, habría sido posible encontrar un mayor porcentaje de reducción de la probabilidad de falla, si hubiesen sido utilizadas las imágenes de los tomogramas con ajuste manual.

Es importante destacar que el porcentaje de individuos donde se sugiere la evaluación de defectos estructurales con un instrumento avanzado es generalmente bajo, como es observado por [18], tal como se refrenda en este artículo. Concordante con [33], es recomendable adaptar una evaluación visual detallada que ayude a la interpretación de las adaptaciones biomecánicas del árbol, reduciendo así la realización de evaluaciones con uso instrumental donde sea realmente es necesario.

**4. Conclusiones.** - No se encontraron diferencias significativas entre los evaluadores al analizar las valoraciones de la probabilidad de falla en los tres niveles de evaluación del riesgo. A su vez, en la evaluación de nivel 3, aplicada en el tronco, se encontró un promedio menor en esta valoración, con una tendencia a reducir las diferencias entre ellos.

Las evaluaciones visuales básicas y el análisis de los tomogramas y resistogramas son vinculantes, especialmente en los árboles que tenían alguna evidencia de problemas estructurales en el tronco.

Para el adecuado análisis de las evaluaciones realizadas con instrumentos, como el tomógrafo sónico, se debe considerar las características de la especie y los hallazgos de la evaluación de nivel 2 del árbol. Asimismo, se releva la importancia de realizar un correcto procesamiento de datos, a fin de evitar la eliminación temprana de árboles.

## 5. Referencias

- [1] Nowak DJ, Crane DE, Stevens JC. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4: 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007>.
- [2] Hernández HJ. 2008. La situación del arbolado urbano en Santiago. *Revista de Urbanismo*, 18: 1-8. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2010.272>.
- [3] Haase D, Larondelle N, Andersson E, Artmann M, Borgström S, Breuste J, Gomez-Baggethun E, Gren Å, Hamstead Z, Hansen R, Kabisch N, Kremer P, Langemeyer J, Rall EL, McPhearson T, Pauleit S, Qureshi S, Schwarz N, Voigt A, Wurster D, Elmqvist T. 2014. A quantitative review of urban ecosystem service assessments: Concepts, models, and implementation. *AMBIO*, 43: 413-433. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0>.
- [4] Hamstead ZA, Kremer P, Larondelle N, McPhearson T, Haase D. 2016. Classification of the heterogeneous structure of urban landscapes (STURLA) as an indicator of landscape function applied to surface temperature in New York City. *Ecological Indicators*, 70: 574-585. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.014>.
- [5] Ponce-Donoso M, Vallejos-Barra O, Ingram B, Daniluk-Mosquera G. 2020. Urban Trees and Environmental Variables: Relationships in a City of Central Chile. *Arboriculture & Urban Forestry*, 46(2): 84-95.
- [6] National Tree Safety Group. 2011. Common sense risk management of trees: Guidance on trees and public safety in the UK for owners, managers and advisers. Forestry Commission. Edinburgh: Forestry Commission. 104 p.
- [7] Vogt J, Hauer RJ, Fischer BC. 2015. The Costs of Maintaining and Not Maintaining the Urban Forest: A Review of the Urban Forestry and Arboriculture Literature. 41(6): 293-323.
- [8] Calaza P, Iglesias I. 2016. El riesgo del arbolado urbano. Contexto, concepto y evolución. Madrid: Mundi-Prensa. 526 p.
- [9] van Wassenae P, Richardson M. 2009. A review of tree risk assessment using minimally invasive technologies and two case studies. *Arboricultural Journal*, 32(4): 275-292. <https://doi.org/10.1080/03071375.2009.9747583>.
- [10] Tomao A, Secondi L, Corona P, Giuliarelli D, Quatrini V, Agrimi M. 2015. Can composite indices explain multidimensionality of tree risk assessment? A case study in an historical monumental complex. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(3): 456-465. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.009>.
- [11] American National Standards Institute. (2011). *ANSI A300 (Part 9)—Tree Risk Assessment a. Tree Failure*. American National Standards Institute.
- [12] Pokorny, J. D. (2003). *Urban Tree Risk Management: A Community Guide to Program Design and Implementation*. USDA Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry. <https://www.fs.usda.gov/naspf/publications/urban-tree-risk-management-community-guide-program-design-and-implementation>
- [13] Wessolly, L., & Erb, M. (2016). *Manual of Tree Statics and Tree Inspection*. Patzer Verlag.
- [14] Okun, A., Brazee, N.J., Clark, J.R., Cunningham-Minnick, M.J. Burcham, D.C., Kane, B. 2023. Assessing the Likelihood of Failure Due to Stem Decay Using Different Assessment Techniques. *Forests*, 14, 1043. <https://doi.org/10.3390/f14051043>.
- [15] Johnstone, D., Ades, P., Moore, G., & Smith, I. (2007). Predicting Wood Decay in Eucalypts Using an Expert System and the IML-Resistograph Drill. *Arboriculture & Urban Forestry*, 33(2), 76-82. <https://doi.org/10.48044/jauf.2007.009>
- [16] Ciftci, C., Kane, B., Brena, S. F., & Arwade, S. R. (2014). Loss in moment capacity of tree stems induced by decay. *Trees*, 28(2), 517-529. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0968-8>
- [17] Lin, C.-J., Lee, C.-J., & Tsai, M.-J. (2016). Inspection and Evaluation of Decay Damage in Japanese Cedar Trees Through Nondestructive Techniques. *Arboriculture & Urban Forestry*,

42(3). <https://doi.org/10.48044/jauf.2016.018>

[18] Wu, X., Li, G., Jiao, Z., & Wang, X. (2018). Reliability of acoustic tomography and ground-penetrating radar for tree decay detection. *Applications in Plant Sciences*, 6(10), 8. <https://doi.org/10.1002/aps3.1187>

[19] Burcham, D. C. (2019). *Can sonic tomography predict loss in load-bearing capacity for trees with internal defects? A comparison of sonic tomograms with destructive measurements*. 15.

[20] Wang, X., & Allison, R. B. (2008). Decay Detection in Red Oak Trees Using a Combination of Visual Inspection, Acoustic Testing, and Resistance Microdrilling. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(1), 4.

[21] Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B., & Lin, H. (2013). Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review. *Plant Soil*, 362, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1455-5>

[22] Koeser, A. K., Hauer, R. J., Klein, R. W., & Miesbauer, J. W. (2017). Assessment of likelihood of failure using limited visual, basic, and advanced assessment techniques. *Urban Forestry & Urban Greening*, 24, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.024>

[23] Nicolotti, G., Socco, L. V., Martinis, R., Godio, A., & Sambuelli, L. (2003). Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Journal of Arboriculture*, 29(2), 66-78.

[24] Rust, S. 2017. Accuracy and Reproducibility of Acoustic Tomography Significantly Increase with Precision of Sensor Position. *Journal of Forest and Landscape Research*, 1 (2017): 1–6. DOI: 10.13141/jflr.v2i1.449

[25] Instituto Uruguayo de Meteorología. 2020. Estadísticas climatológicas [En línea]. 31 agosto 2020. <https://www.inumet.gub.uy/index.php/clima/estadisticas-climatologicas>.

[26] Dunster, J. A., Smiley, E. T., Matheny, N., & Lilly, S. (2017). *Tree Risk Assessment Manual* (2ª ed). International Society of Arboriculture.

[27] Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, CW Robledo. 2020. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina [En línea]. 23 marzo 2020. <http://www.infostat.com.ar>.

[28] Rinn, F. (2012). *ARBOTOM User Manual*. Rinntech.

[29] Koeser, A. K., Hasing, G., McLean, D., & Northrop, R. (2016). Tree Risk Assessment Methods: A Comparison of Three Common Evaluation Forms. *Environmental Horticulture Department, UF/IFAS Extension*, 8.

[30] Boland, D., Brooker, M., Chippendale, G., Hall, N., Hyland, B., Johnston, R., Kleinig, D., McDonald, M., & Turner, J. (2006). *Forest Trees of Australia* (5.ª ed.). CSIRO Publishing. <https://doi.org/10.1071/9780643069701>

[31] Tortorelli, L. A. (2009). *Maderas y bosques argentinos* (2ª, Vol. 1). Orientación Gráfica Editora.

[32] Rollo, F. (2010). *Identificação de padrões de resposta à tomografia de impulso em tipuanas (Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze)* [Mestrado em Recursos Florestais, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.11.2010.tde-16032010-142305>

[33] Cheng-Jung, L., Chia-Ju, L. & Ming-Jer, T. 2016. Inspection and Evaluation of Decay Damage in Japanese Cedar Trees Through Nondestructive Techniques. *Arboriculture & Urban Forestry*. 42(3), 201–212.

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

APCD ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

OVB ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MPD ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

## **Lista de Autores – Memoria Investigaciones en Ingeniería (Número 24).**

Dr. Víctor Adrián Ponce Estrada, Universidad Nacional de Moquegua (Perú)

Ing. Elvis Jovito Huaraya Manzano, Universidad Nacional de Moquegua (Perú)

Ing. Yalmar Carrera, Universidad Católica San Pablo (Perú)

Dr. Enrique Simbort, Universidad Católica San Pablo (Perú)

Prof. Muhammad Uzair, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)

Prof. Asad A. Naqvi, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)

Prof. Syed Umair H. Kazmi, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)

Mag. Hugo A. Ccama Condori, Universidad Nacional del Altiplano (Perú)

Mag. Marxia K. Herrera Quispe, Universidad Nacional del Altiplano (Perú)

Mag. Luz V. Panca Humpiri, Universidad Nacional del Altiplano (Perú)

Dr. Atif Shazad, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)

Prof. Muhammad Uzair, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)

Dr. Atif Shazad, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)

Prof. Junaid Jadoon, Pakistan Institute of Engineering & Applied Sciences (Pakistan)

Prof. Muhammad Uzair, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)

Prof. Muhammad Muzammil, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)

Mag. José E. Solsona, Facultad de Ingeniería, Universidad ORT Uruguay (Uruguay)

Mag. Alfonso Vicente, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay)

Prof. Adrián Silveira, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay)

Prof. Gustavo Betarte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay)

Prof. Maximiliano Cristiá, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay)

Prof. Carlos Luna, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay)

Dr. Vivian Severino, Facultad de Agronomía, Universidad de la República (Uruguay)

Ing. Carlos Menoni, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay)

Ing. Diego Alonso, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay)

Ing. Felipe Saravia, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay)

Dr. Nicolás Pérez, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay)

Dr. Leonardo Steinfeld, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay)

Dra. Ana Paula Coelho-Duarte, Facultad de Agronomía, Universidad de la República (Uruguay)

Dr. Óscar Vallejos-Barra, Facultad de Agronomía, Universidad de la República (Uruguay)

Dr. Mauricio Ponce-Donoso, Facultad de Agronomía, Universidad de la República (Uruguay)



## **Lista de Revisores – Memoria Investigaciones en Ingeniería (Número 24).**

Dra. Martina Inmaculada Álvarez Fernández, Universidad de Oviedo (España)  
Ing. Tulio Antonio Antezano Inga, Universidad de Ingeniería y Tecnología (Perú)  
Dr. Ciro Martínez Oropesa, Universidad Autónoma de Occidente (Colombia)  
Dr. Genner Villarreal Castro, Universidad Privada Antenor Orrego (Perú)  
Ing. Esteban Darío Gualguan Galindez, Universidad Mariana (Colombia)  
Dr. Muhammad Akhter, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)  
Dr. Jeffery Ali Rizvi, Sir Syed University of Engineering and Technology (Pakistan)  
Dr. Ahsan Ahmed, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)  
Mag. José Andrés de la Torre Ugarte, Pontificia Universidad Católica del Perú (Perú)  
Dr. Salvador García Rodríguez, Tecnológico de Monterrey (México)  
Dr. Asad Naqvi, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)  
Dr. Muhammad Asif, National University of Sciences and Technology (Pakistan)  
Dr. Syed Asad Zaidi, Hamdard University (Pakistan)  
Prof. Tariq Jamil, University of Colorado Boulder (USA)