

# TECHNOLOGY, ENERGY AND ENVIRONMENT IN CONSTRUCTION

**Editors:**

*Javier Cárcel Carrasco  
Luís Palmero Iglesias  
Aurora Martínez Corral*



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



I INTERNATIONAL CONFERENCE  
SUSTAINABLE CONSTRUCTION AND  
DEMOLITION | VALENCIA 17-18 NOV 2021

Ingeniería y Tecnología





# TECHNOLOGY, ENERGY AND ENVIRONMENT IN CONSTRUCTION

## ***Editors:***

*Javier Cárcel Carrasco<sup>1</sup>*

*Luis Palmero Iglesias<sup>1</sup>*

*Aurora Martínez Corral<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>(Universitat Politècnica de València)*



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**GENERALITAT  
VALENCIANA**

Conselleria d'Innovació,  
Universitats, Ciència  
i Societat Digital

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados por el Comité Científico del I INTERNATIONAL CONFERENCE SUSTAINABLE CONSTRUCTION AND DEMOLITION, por el procedimiento de revisión ciega por pares.

Este Trabajo ha tenido la financiación de la Generalitat Valenciana dentro del programa de I+D+i para SUBVEN- CIONES PARA LA ORGANIZACIÓN Y DIFUSIÓN DE CONGRESOS, JORNADAS Y REUNIONES CIENTÍFICAS, TEC- NOLÓGICAS, HUMANÍSTICAS O ARTÍSTICAS DE CARÁCTER INTERNACIONAL, CON CLAVE AORG/2021/023



**Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L.**

Quedan todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida, distribuida, comunicada públicamente o utilizada, total o parcialmente, sin previa autorización.

© del texto: **los autores**

ÁREA DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO, S.L.

Avda. Juan Gil Albert, 1- 03802- ALCOY (ALICANTE) [info@3ciencias.com](mailto:info@3ciencias.com)

Primera edición: **febrero 2022**

ISBN: **978-84-123872-8-5**

DOI: <https://doi.org/10.17993/IngyTec.2022.82>



## **Editors / Editores:**

Javier Cárcel Carrasco<sup>1</sup>

Luis Palmero Iglesias<sup>1</sup>

Aurora Martínez Corral<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Universitat Politècnica de València)

## **ORGANIZATION COMMITTEE**

### **PRESIDENCY**

Javier Cárcel Carrasco – Universitat Politècnica de València (Spain)

### **VICE-PRESIDENCY COMMITTEE ORGANIZATION**

Luis Palmero Iglesias – Universitat Politècnica de València (Spain)

Elisa Peñalvo López – Universitat Politècnica de València (Spain)

Teresa M. Pellicer – Universitat Politècnica de València (Spain)

Vicente López Mateu – Universitat Politècnica de València (Spain)

## **HONOUR COMMITTEE**

José Esteban Capilla Romá – Excelentísimo Rector Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

Edward S. Rubin – Nobel Prize 2007 – Carnegie Mellon University (USA)

Elías Hurtado Pérez – Director Departamento de Ingeniería Eléctrica (UPV, Spain)

Eugenio Pellicer – Director ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UPV, Spain)

Federico Bonet Zapater – Decano Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en la Comunidad Valenciana (Spain)

Fernando Cos-Gayón – Director ETS de Ingeniería de Edificación (UPV, Spain)

Javier Benlloch Marco – Director Centro de Investigación de Tecnología de la Edificación (UPV, Spain)

José Luis Bonet Senach – Director Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil (UPV, Spain)

José M. Fran Bretones – Director Departamento de Construcciones Arquitectónicas (UPV, Spain)

Jorge García-Serra García – Director ETS de Ingeniería Industrial (UPV, Spain)

Juan López Martínez – Director Instituto de Tecnología de Materiales (UPV, Spain)

Iván Cabrera Fausto – Director ETS de Arquitectura (UPV, Spain)

Luis Sendra Mengual – Decano Colegio de Arquitectos de la Comunidad Valenciana (Spain)

Manuel L. Romero – Director Instituto Universitario de Ciencia y Tecnología del Hormigón (UPV, Spain)

Salvador Puigdemongas Rosas – Decano Colegio de Ingenieros industriales de la Comunitat Valenciana (UPV, Spain)

## ORGANIZATION COMMITTEE

Angel Pérez-Navarro Gómez – Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

José Ramón Albiol Ibañez – Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

Graziella Bernardo – Università degli Studi della Basilicata, Matera (Italy)

Iván Cabrera Fausto – Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

Javier Cárcel Carrasco – Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

Agostino Catalano – Università degli studi del Molise (Italy)

Shidan Cheng – Wuhan University (China)

Szymon Dawczyński – Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)

Giacomo Di Ruocco – Università degli Studi di Salerno (Italy)

José M<sup>a</sup> Fran Bretones – Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

Avi Friedman – McGill University, Montreal, Quebec (Canada)

José Manuel Gandía Romero – Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

Cristian García García – Salesian Polytechnic University of Ecuador (Ecuador)

Antonella Guida – Università della Basilicata (Italy)

Jaime Llinares Millán – Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

Vicente López Mateu – Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

Aurora Martínez Corral – Universitat Politècnica de València (Spain)

Sebastiano Maltese – University of Applied Sciences and Arts (Switzerland)

Andrea Nanetti – Nanyang Technological University (Singapore)

Luis Palmero Iglesias – Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

Teresa M. Pellicer – Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

Elisa Peñalvo López – Universitat Politècnica de Valencia (Spain)

Ali Taha Omar – Supervisor for the Administration of Training & Human Development

## SCIENTIFIC COMMITTEE

Agostino Catalano – Università degli studi del Molise (Italy)

Alessandra Cernaro – Università degli Studi di Messina (Italy)

Ali Taha Omar – Administration of Training & Human Development, MSA, (Egypt)

Ana Cardoso de Matos – Universidade de Évora-CIDEHUS (Portugal)

Andrea Nanetti – Nanyang Technological University (Singapore)

Angel Pérez-Navarro Gómez – Universitat Politècnica de València (Spain)

Antonella Guida – Università della Basilicata (Italy)

Antonio Manuel Romero Sedo – Universitat Politècnica de València (Spain)

Aurora Martínez Corral – Universitat Politècnica de València (Spain)

Avi Friedman – McGill University (Canada)  
Carla Montagud Montalvá – Universitat Politècnica de València (Spain)

Carlos Alberto Mariottoni – Unicamp and Lodestar EAD University (Brazil)

Carlos Roldán Blay – Universitat Politècnica de València (Spain)

Carlos Roldán Porta – Universitat Politècnica de València (Spain)

Carolina Aparicio Fernández – Universitat Politècnica de València (Spain)

Cesar Berna Escriché – Universitat Politècnica de València (Spain)

Cesar Velandia Silva – Universidad Ibagué (Colombia)

Cristian García García – Salesian Polytechnic University of Ecuador (Ecuador)

Consuelo Gómez Gómez – Universitat Politècnica de València (Spain)

David Alfonso Solar – Universitat Politècnica de València (Spain)

Eduardo Peñaloza Kairuz – Universidad Ibagué (Colombia)

Elías Hurtado-Pérez – Universitat Politècnica de València (Spain)

Elisa Peñalvo López – Universitat Politècnica de València (Spain)

Enrico Sicignano – Università degli Studi di Salerno (Italia)

Fabio Minutoli – Università degli Studi di Messina (Italia)

Fabiola Colmenero Fonseca – Universidad Jesuita de Guadalajara ITESO (Mexico)

Fidel Salas Vicente – Universitat Politècnica de València (Spain)

Fernando Cos-Gayón – Universitat Politècnica de València (Spain)

Fulvio Re Cecconi – Politecnico di Milano (Italy)

Francisco Hidalgo Delgado – Universitat Politècnica de València (Spain)

Francesco Marino – Università degli Studi della Basilicata (Italia)

Francklin Rivas – Universidad Tecnica Federico Santa Maria (Chile)

Giacomo Di Ruocco – Università degli Studi di Salerno (Italia)

Graziella Bernardo – Università degli Studi della Basilicata (Italy)

Gonzalo de Murga – Organización de las Naciones Unidas (ONU)

Guillermo Escrivá Escrivá – Universitat Politècnica de València (Spain)

Helena Granados – CSCAE (Spain)

Inmaculada Tormo Clemente – Universitat Politècnica de València (Spain)

Iván Cabrera Fausto – Universitat Politècnica de València (Spain)

Jaime Langa – Universitat Politècnica de València (Spain)

Jaime Llinares Millán – Universitat Politècnica de València (Spain)

Javier Benlloch Marco – Universitat Politècnica de València (Spain)

Javier Cárcel-Carrasco – Universitat Politècnica de València (Spain)

José Antonio Cárcel Carrasco – TECNATOM (Spain)

José Luís Vivancos Bono – Universitat Politècnica de València (Spain)

José M. Fran Bretones – Universitat Politècnica de València (Spain)

José Manuel Gandía Romero – Universitat Politècnica de València (Spain)

José Miguel Molines Cano – Universitat Politècnica de València (Spain)

José Ramón Albiol Ibáñez – Universitat Politècnica de València (Spain)

Juan Antonio García Esparza – Universitat Jaume I Castelló (Spain)

María Martín–Morales – Universidad de Granada (Spain)

Juan López Martínez – Universitat Politècnica de València (Spain)

María Martínez Rojas – Universidad de Málaga (Spain)

Luigi Mollo – Università degli Studi della Campania «Luigi Vanvitelli» (Italy)

Mariangela De Vita – Italian National Research Council CNR

Luis Palmero Iglesias – Universitat Politècnica de València (Spain)

Marianna Rotilio – Università dell'Aquila (Italy) María Luisa Collado López – Universitat Politècnica de València (Spain)

Manuel Jesús Ramírez Blanco – Universitat Politècnica de València (Spain)

Mary Vergara Paredes – Salesian Polytechnic University of Ecuador (Ecuador)

Manuel Pascual Guillamón – Universitat Politècnica de València (Spain)

Matthew Bunza – University of Oregon (USA)

Manuel Rodríguez Méndez – UEseypro (Spain) Manuel Valcuende Payá – Universitat Politècnica de València (Spain)

Nadia Yeksarova – Odessa State Academy of Civil Engineering & Architecture (Ukraine)

Marcos Silvano – Universidade Federal do Rio de Janeiro / UFRJ (Brasil)

Olimpia Niglio – Hokkaido University, Sapporo (Japan)

M. <sup>a</sup> Dolores Salvador Moya – Universitat Politècnica de València (Spain)

Ornella Fiandaca – Università degli Studi di Messina (Italy)

María Carmen Llinares Millán – Universitat Politècnica de València (Spain)

Paloma Arrué Burillo – Universitat Politècnica de València (Spain)

María Cristina Moros Gómez – Universitat Politècnica de València (Spain)

Pedro Gerardo Salinas Martínez – Universitat Politècnica de València (Spain)

María del Carmen Carnero Moya – Universidad de Castilla La Mancha (Spain)

Pierfrancesco Fiore – Università degli Studi di Salerno (Italy)

María D. Martínez-Aires – Universidad de Granada (Spain)

Pierluigi De Berardinis – Università dell'Aquila (Italy)

Pilar Mercader Moyano – Universidad de Sevilla (Spain)

Rafael Capúz Lladró – Universitat Politècnica de València (Spain)

Rafael Suárez Medina – Universidad de Sevilla (Spain)

Raffaella Lione – Università degli Studi di Messina (Italy)

Rosa Agliata – Università degli Studi della Campania «Luigi Vanvitelli» (Italia)

Rosa María Domínguez Caballero – Universitat Politècnica de València (Spain)

Rosana Muñoz – Universidade Federal da Bahia (Brasil)

Sandro Parrinello – Università degli studi di Pavia (Italy)

Sara Gonizzi Barsanti – Università degli Studi della Campania, Luigi Vanvitelli (Italy)

Sebastiano Maltese – University of Applied Sciences and Arts (Switzerland)

Shidan Cheng – Wuhan University (China) Sibel Onat Hattap – Mimar Sinan Fine Arts University (Turkey)

Stefania De Gregorio – Università dell'Aquila (Italy)

Svetlana Maksimova – PERM National Research Polytechnic University (Russia)

Szymon Dawczyński – Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)

Tatjana Vilutienė – Vilnius Gediminas Technical University (Lithuania)

Teresa M. Pellicer – Universitat Politècnica de València (Spain)

Thiago Arruda Mariottoni – Technoeuro – Lodestar EAD University (Brazil)

Thomas Wessel – Jade Hochschule Wilhelmshaven (Germany)

Tiziana Poli – Politecnico di Milano (Italy) Tomás Gómez-Navarro – Universitat Politècnica de València (Spain)

Umberto Varum – Universidade do Porto (Portugal)

Vicente Blanca Giménez – Universitat Politècnica de València (Spain)

Vicente López-Mateu – Universitat Politècnica de València (Spain)

Víctor Yepes Piqueras – Universitat Politècnica de València (Spain)

## **OPERATING COMMITTEE**

Alejandra Cianci Ramírez – Universitat Politècnica de València (Spain)

Ali Rafat Gigasari – Universitat Politècnica de València (Spain)

Alonso García García – Universitat Politècnica de València (Spain)

Alonso Mansilla Guajardo – Universitat Politècnica de València (Spain)

Clara Andrada Monros – Universitat Politècnica de València (Spain)

Eva Vazquez Navarro – Universitat Politècnica de València (Spain)

Flora Francis Kannampallil – Universitat Politècnica de València (Spain)

Francesco Tuzio – Universitat Politècnica de València (Spain)

Héctor Ortiz Arnau – Universitat Politècnica de València (Spain)

Irene Bordils Herrero – Universitat Politècnica de València (Spain)

Jangveer Kaur – Universitat Politècnica de València (Spain)

Laura Molina Cañamero – Universitat Politècnica de València (Spain)

Manuel Calabuig Pastor – Universitat Politècnica de València (Spain)

Marcos Gamella – Universitat Politècnica de València (Spain)

## SPONSORS



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
ARQUITECTURA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
INGENIERÍA DE  
EDIFICACIÓN



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR D'ENGINYERIA  
INDUSTRIAL VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior  
de Ingeniería Agronómica  
y del Medio Natural



CONV COL·LEGI  
D'ARQUITECTES  
DE LA COMUNITAT  
VALENCIANA



CAATIE VALENCIA  
Colegio Oficial de  
Aparajadores, Arquitectos Técnicos  
e Ingenieros de Edificación de Valencia



COLEGIO  
INGENIEROS  
INDUSTRIALES  
COMUNITAT VALENCIANA



DEPARTAMENTO  
DE INGENIERÍA DE  
LA CONSTRUCCIÓN  
Y DE PROYECTOS  
DE INGENIERÍA CIVIL



Instituto  
Ingeniería  
Energética



## FINANCER

GVA, Conselleria d'Innovació, Universitats, Ciència i Societat Digital. AORG/2021/023



GENERALITAT  
VALENCIANA

Conselleria d'Innovació,  
Universitats, Ciència  
i Societat Digital



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

|                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| SUMMARY .....                                                                                                                                 | 17  |
| PROLOGUE .....                                                                                                                                | 19  |
| METHODOLOGY TO EVALUATE THE FEASIBILITY OF LOCAL BIOMASS RESOURCES AS A FUEL FOR BUILDING BOILERS. APPLICATION TO A MEDITERRANEAN AREA .....  | 21  |
| ISOLANTI TERMICI NANOTECNOLOGICI: OPPORTUNITÀ O INADEGUATEZZA PER LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DELL'ESISTENTE .....                         | 31  |
| ANALYSIS AND BEHAVIOR OF DIFFERENT MATERIALS IN SUSTAINABLE CONSTRUCTION AND THEIR ALTERNATIVES FOR THE IMPROVEMENT OF THE ENVIRONMENT ... .. | 47  |
| DISEÑO ÓPTIMO DE UN SISTEMA HÍBRIDO RENOVABLE APLICADO A CAMPUS UNIVERSITARIO EN MÉXICO.....                                                  | 59  |
| EL COVID-19, LA NORMATIVA DE VENTILACIÓN Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN LAS UNIVERSIDADES EN MÉXICO .....                                          | 71  |
| PLANIFICACIÓN DE DISTRITOS DE ENERGÍA POSITIVA EN FRENTES MARÍTIMOS URBANOS DEL MEDITERRÁNEO. ....                                            | 83  |
| DIAGNÓSTICO DE LA VENTILACIÓN DE UN LABORATORIO DOCENTE DE LA ETSIE DE LA UPV.....                                                            | 95  |
| FEASIBILITY OF USING GREEN ROOF AND SHADING DEVICE BY ADOPTING THE TOTAL ENERGY CONSUMPTION APPROACH: A CASE STUDY IN TEHRAN.....             | 107 |
| COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO EN LAS UNIONES SOLDADAS, ANÁLISIS DEL MÉTODO DE DESGASTE COMO MEDIDA DE MEJORA A LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL.....     | 119 |
| DIAGNÓSTICO DEL FALLO EN LAS INSTALACIONES DE BOMBEO EN PISCINAS OLÍMPICAS .....                                                              | 135 |
| HORMIGONES DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL: LOS GEOPOLÍMEROS. EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA .....                                                     | 147 |
| ENHANCEMENT OF THE REINFORCEMENT CONCRETE STRUCTURES BY MEANS OF SMART MONITORING SYSTEMS.....                                                | 157 |
| CERRAMIENTOS DE ALTA EFICIENCIA ENERGÉTICA. CASO DE ESTUDIO SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN: THERMA-WALL. PARTE I .....                               | 169 |
| CERRAMIENTOS DE ALTA EFICIENCIA ENERGÉTICA. CASO DE ESTUDIO SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN: THERMA-WALL. PARTE II .....                              | 181 |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO MEDI-<br>ANTE LA REGULACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS COMPRESORES ..... | 193 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## **SUMMARY**

In this book, the central theme is technology, energy and environment in construction. The best works presented to the International Conference on Sustainable Construction and Demolition are edited as book chapters, which were carefully reviewed and selected on the basis of articles of relevance, clarity and originality and published in this Book of Chapters. The international conference was held in Valencia, Spain on 17-18 November 2021.



## **PROLOGUE**

### **Technology, energy and environment in construction.**

This book shows in the form of book chapters the best works presented at the 1st International Conference on Sustainable Construction and Demolition held in Valencia, Spain, from November 17 to 18, 2021, under the thematic area of sustainability in construction.

This conference sought to disseminate the current situation from a perspective of improvement in the construction sector, where technological advances need to be constantly reviewed to manage their evolution efficiently and sustainably.

The conference dealt with Sustainability in Construction, Technology, Energy, Environment, Circular Economy and Life Cycle Analysis, debating in an international forum with innovative contributions that will undoubtedly give positive results in the immediate future.

The Conference has been a platform for contributions with an academic community established in collaboration with the professional world and the business sector to present and discuss new and current work. This has resulted in the Conference being successful.

All the book chapters were subjected to a review process by reviewers of the scientific committees, external reviewers and members depending on the corresponding topic of the article. After a rigorous review process, the chapters were selected based on their originality, relevance and clarity for the purpose of the conference presentation.



# METHODOLOGY TO EVALUATE THE FEASIBILITY OF LOCAL BIOMASS RESOURCES AS A FUEL FOR BUILDING BOILERS. APPLICATION TO A MEDITERRANEAN AREA

**David Alfonso-Solar<sup>1</sup>, Carlos Vargas-Salgado<sup>2</sup>, Elías Hurtado-Pérez<sup>2</sup>, Paula Bastida-Molina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Instituto de Ingeniería Energética, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, edificio 8E, acceso F, 2ª planta. 46022 Valencia (España), [paubasmo@etsid.upv.es](mailto:paubasmo@etsid.upv.es)*

<sup>2</sup>*Department of Electrical Engineering, Universitat Politècnica de València, Spain.  
[carvarsa@upvnet.upv.es](mailto:carvarsa@upvnet.upv.es)*

## ABSTRACT

The massive implementation of distributed energy resources based on biofuels requires a complex methodology to assess the optimal energy valorization options and economic feasibility. This paper has focused on producing pellets for boilers. The work focuses on the residential and commercial sectors. To consume local biomass, it must be considered the availability of potential customers, biomass availability, properties, and dispersion to evaluate transport cost. The developed methodology was applied to three different counties of the Valencian Community (typical of Mediterranean areas). Biomass resources for different counties have been quantified and characterized regarding key issues as heating value and ash content. Considering every evaluated area (the typical total area in the range 600 to 1800 km<sup>2</sup>) as a biomass management unit, the impact of pellet production plant size and biomass transport costs for three different counties was evaluated. However, different balances between biomass resources availability and self-consumption potentials are obtained, the economic feasibility of pellet plants was acceptable in the three cases with payback periods from 5 to 6 years.

**Keywords:** Renewable energy, Biomass, Pellet, Cogeneration, Distributed Energy Resources.

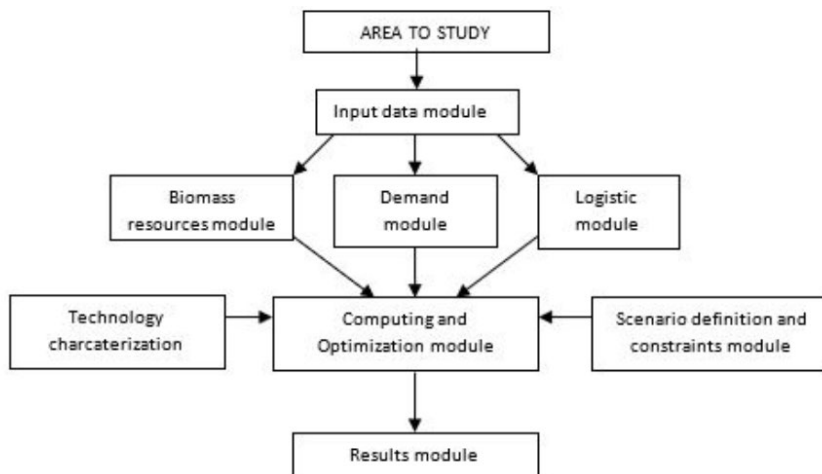
## INTRODUCTION

The massive implementation of distributed energy resources is a key strategy to increase energy efficiency and reliability of supply. Biomass applications imply large savings in harmful emissions to the atmosphere taking advantage of local resources, sustainably, with competitive costs. The rapid deployment of biomass installations requires the development of a general methodology to:

- Evaluate the quantity, quality, and availability of these residues in the area of interest.
- Determine demand segmentation and identification of segments with high potential to use biofuels (pellets, wood chips)
- Develop an optimal logistic strategy to minimize the harvesting, collecting, and distribution costs and environmental impact.
- Analyze available technologies for biomass pretreatment (drying, grinding, and densification) and combined heat and power generation.

This methodology is based on the figure of the transfer centers. These installations are located in strategic points to optimize the logistic process and present different morphologies; they include storage areas and have a pretreatment system and/or a cogeneration system. In these centers, biomass can be converted into electricity, heat and /or standardized biofuels (pellets).

Cogeneration systems can cover the biomass pretreatment process's thermal and electrical needs (drying, grinding, pelletization) (Zailan, *et al.*, 2021) When installed in the transfer center, there are several advantages because biomass is a heterogeneous resource. There are many types with different properties; it is possible to produce standard biofuels with higher quality biomass (i.e., low ash content) and consume low-quality biomass in the cogeneration system to produce valuable energy products as heat and electricity with competitive costs.



**Figure 1:** Scheme of methodology to assess the optimal energy valorization of biomass resources.

## METHODOLOGY

The methodology is being implemented using Geographic Information Systems software and is structured in eight modules, as described in Fig 1. In the next paragraphs, the global approach and the different modules are described.

### **Input data module**

This module must introduce the cartographic data regarding urban areas, agricultural areas and crops, forest areas, industrial activities areas, municipalities divisions, and road networks. Statistical data for each municipality regarding population, type of dwelling, services, and industrial activities will also be employed and represented geographically. Standard data formats for this module are fixed due to current data availability, format, and accuracy.

### **Biomass resources module**

Biomass sources initially considered in the analysis are forestry, agricultural crops, and some related industries' wastes. Quantification of Biomass resources is performed by generation ratios (tonne residues per Ha, tonne residues per tonne of product, or tonne residues per k€ of turnover) and represented in the map using cartographic and statistical data. Characterization of Biomass (i.e., Higher heating value, composition, moisture, and ash content) is assessed using European databases (TNO 2021., Reisinger,1995) from previous projects, sectorial studies, and additional laboratory analysis. The geographic location of biomass residues is performed using a resolution of 1-km<sup>2</sup> pixel (for superficial generation), and seasonality is evaluated monthly according to typical labor operations during the year for each crop (for agricultural wastes) and typical production cycles for each crop industry.

This module defines the availability of each type of biomass, being important to consider that some biomass types as cereal straw can present low availability (Passalacqua *et al.*, 2004) (20 45% from total waste production) because it is being used for animal feeding and bedding.

### **Demand module**

Potential demand segments or typical customers must be defined (hospitals, individual houses, blocks of apartments, industries, etc.). According to statistical and cartographic data of municipalities, these demand points are fixed on the map (mainly

urban areas and industrial areas). These points will be used to compute biofuel distribution distances to final users. Further grouping of these segments is considered according to the size of installable thermal or cogeneration applications because it can be related to biomass quality. Typically, small customers (residential and small commercial) segments require high-quality biofuels (low ash, sodium, chlorine, and sulfur content). Large customers can also use lower-quality biofuels to deal with ash disposal, gas cleaning, and maintenance requirements. According to several manufacturer's catalogs, boilers for thermal or cogeneration applications can be classified in the ranges summarized in Table 1.

Demand calculations are based on statistics of consumptions per household and the type of energy to supply (electricity or fuel) of the boiler (Alfonso *et al.*, 2009; Perpiñá *et al.*, 2008; Roni, 2019; Graham *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2020).

| Boiler size (kW) | Segments                                                        | Biofuel quality needs (pellets)                  |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| <100             | Residential and small commercial customers                      | High Quality (i.e ash content < 1% in dry basis) |
| 100 to 2,000     | Medium/Large commercial segments and small industrial customers | Medium quality (i.e. ash content 1 – 3 %)        |
| >2,000           | Medium/large industrial customers and district heating plants.  | Low quality (i.e. ash content 3 – 6 %)           |

**Table 1.** Relation between boiler size, typical demand segment, and biofuel quality needs

## Logistic module

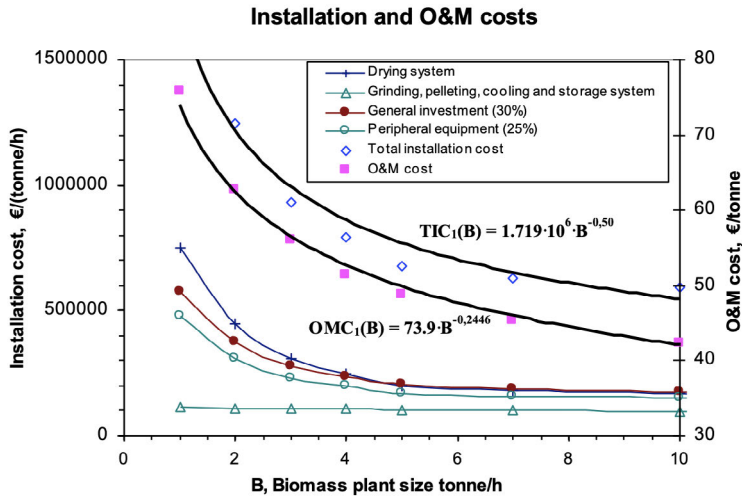
According to road network characteristics and accessibility to biomass sources, this module allows computing transport time and distances between two generic points  $x$  (origin) and  $y$  (destination) in the area of study; these functions are called  $\text{Time}(x,y)$  and  $\text{Distance}(x,y)$ . Sources or origins of biomass are fixed, and destination can be fixed by the restrictions of the scenario (i.e., present power plants, hospitals, industrial customers, etc.) by applying an algorithm of minimization of transport costs (according to transport time and distances) to define the optimum destination for a covered area. Typically, biomass transport cost function boiler (Alfonso *et al.*, 2009; Perpiñá *et al.*, 2008; Graham *et al.*, 2001) BTC (€/tonne), is composed of fixed costs, FC (€/tonne), distance-dependent costs, DC (€/tonne-km), and time-dependent costs, TC (€/tonne-hour), as defined by equation 1:

$$\text{BTC}(x,y) = \text{FC} + \text{DC} \cdot \text{Distance}(x,y) + \text{TC} \cdot \text{Time}(x,y) \quad (1)$$

## Technology characterization module

### Pretreatment technologies. Pellet plant

The pretreatment plants can produce pellets in a general approach and be composed of drying, grinding, pelleting and cooling systems, peripheral equipment, storage facilities, and other general facilities. These pelleting plants are characterized according to bibliography from an economic and energy needs point of view, by several functions (Zailan ,2021) for each technology as Installation cost,  $IC_1(B)$  (€ per tonne/h), specific Energy consumption,  $E_{Electricity}$  and  $E_{fuel}$  (kWh/tonne) and specific Operation and Maintenance costs of the whole plant,  $OMC_1(B)$  (€/tonne). These functions can be constants or considered a function of the plant capacity,  $B$ , measured in terms of the hourly amount of managed raw biomass (tonne/h). In Fig 2 it has been represented the function  $IC_1(B)$  for the different systems and the total pelleting plant installation cost  $TIC_1(B)$ , and function  $OMC_1(B)$  considering biomass with 40% moisture, continuous operation, and 3,200 h/year of operation.



**Figure 1:** Biomass pelleting plant-specific Installation and O&M costs as a function of the plant size (Alfonso *et al.*,2009; Perpiñá *et al.*,2008)

## Scenario definition and constraints module

The scenario definition is represented by a set of constraints to be considered in the optimization process. Inside this module, there is a complete list of possible scenarios to be analyzed but, before simulating the selected scenario, a basic pre-selection of suitable scenarios is made automatically. Both pre-selection and detailed simulations of the selected scenarios are performed in the computing and optimization

module, so there is an initial interaction between these two modules. Table 2 describes two scenarios of the methodology.

| Scenario   | Description and constraints                                                                                                  |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AGRIPELLET | Only biomass from agricultural crops. Transport distance<25km and optimum destinations. Pellets as the unique energy product |
| BIOCOMBI   | Biomass from agricultural crops, forestry, and related industries. Transport distance<30 km and optimum destinations.        |

**Table 2.** Description and constraints of main scenarios of the methodology  
For specific feasibility analysis in the following points, it was selected the BIOCOMBI scenario.

### Computing and Optimization module

The main optimization computing can be performed based on economic suitability or efficiency and CO<sub>2</sub> savings; the first is described below.

Economic optimization is an iterative process based on computing the payback period of the transfer center for each y possible location (as a general approach, it is considered one iteration per 1-km<sup>2</sup> pixel of the analyzed area). The payback period is computed, as described in Equations 2 to 4, with the total installation costs of the transfer center, generally TIC<sub>1</sub> and TIC<sub>2</sub> (€), total O&M cost, TOMC (k€/year), total raw biomass cost, TRBC (k€/year), total biomass transport cost, TBTC (k€/year) and energy products revenues, EPROD (k€/year).

$$\text{PAYBACK PERIOD}_y = \frac{\text{TIC}_1(B) + \text{TIC}_2(B)}{\text{EPROD} - \text{TRBC} - \text{TBTC} - \text{TOMC}(B)} \quad (2)$$

$$\text{TBTC}_y = \sum_x \text{BTC}(x,y) \quad (3)$$

$$\text{TOMC}(B) = B \cdot 3200 \frac{\text{hours}}{\text{year}} [\text{OMC}_1(B) + \text{OMC}_2(B)] \quad (4)$$

It can be observed that the main variable for the economic optimizations is the size of the plant, B (tonne/h of raw biomass). It is important to notice that usually, B is a function of distance concerning the destination point. So length has two opposite effects: on the one hand, a higher radius provides higher B, so specific installation costs are lower, but on the other hand, a higher radius provide higher biomass transport costs so that the methodology will provide a unique optimum solution for a certain B and maximum transport distance.

## RESULTS MODULE

This module shows the results for the selected scenarios; typically, the main results are:

- Plant localization and size (tonne of biomass per year)
- Main biomass types and properties (average and specific for each type).
- Selected Technologies: Installation costs and O&M costs, pellet production
- Economic feasibility

| IDENTIFICATION AND GENERAL RESULTS AT THE DISTRICT LEVEL          |           |                           |                |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------|----------------|
| County code                                                       | 4600G01   | 4617                      | 4620           |
| County name                                                       | L'Horta   | La Plana de Utiel-Requena | La Ribera Alta |
| County total area, km <sup>2</sup>                                | 620       | 1721                      | 970            |
| Biomass, kt-year <sup>-1</sup>                                    | 51,667    | 77,088                    | 64,574         |
| Biomass, t·h <sup>-1</sup> - 5000 h-year <sup>-1</sup>            | 16.1      | 24.1                      | 20.2           |
| Average LHV, kWh·kg <sup>-1</sup>                                 | 2.90      | 3.10                      | 2.96           |
| Ash content, % dry basis                                          | 6.9%      | 2.9%                      | 1.9%           |
| Mean transport distance, km                                       | 16.79     | 23.1                      | 16.99          |
| Transport cost, €·t <sup>-1</sup>                                 | 20.53     | 24.3                      | 20.40          |
| Local demand,<br>% of self-consumed biomass                       | 304%      | 3%                        | 63%            |
| APPLICATION BP1. PELLET PRODUCTION PLANT                          |           |                           |                |
| Pellet production, kt-year <sup>-1</sup>                          | 3,3225.90 | 49,075.43                 | 40,125.56      |
| Specific investment, k€·t <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>          | 394.7     | 326.4                     | 360.0          |
| Simple payback period_BP1, year                                   | 5.8       | 5.1                       | 5.3            |
| CO2 savings_BP1, kg CO2 ·kWh <sup>-1</sup><br>of raw biomass [**] | 0.191     | 0.176                     | 0.181          |

[\*\*] CO2 savings based on boiler fuel substitution (mainly natural gas/diesel fuel). It has been taken into account CO2 emissions due to biomass transport, collection and pelletization process (Alfonso *et al.*,2009; Perpiñá *et al.*,2008).

**Table 3.** Main results of methodology application for three districts of C.V.

## CONCLUSION

Distributed Biomass resources management requires a complex multicriteria methodology where logistic strategy is the main factor in performing the optimization for a selected scenario. However, other features must also be considered: scale, cogeneration system capabilities, biomass availability, and properties and potential consumers.

A methodology fulfilling all these requirements has been developed. It is based on flexible biomass transfer centers with multiple possible energy products as biofuels, electricity, and heat.

Preliminary application of the methodology showed big differences between counties, from counties with high demand as 4,600 L'Horta (grouped small counties around Valencia city) but without including city demand) which could consume three times the available biomass, to big counties as 4,620 La Plana de Utiel-Requena, with high biomass availability (due to the higher agricultural/forestry sources) but with very limited demand so consuming only 3% of available biomass. Using the county as management, biomass properties, quantity, and feasibility analysis for pellet production plants were adequate.

## REFERENCES

- "Chemical Engineering : BIOBIB."** <https://www.vt.tuwien.ac.at/biobib/EN/> (accessed Jul. 28, 2021).
- C. Perpiñá, D. Alfonso, Á. Pérez-Navarro, E. Peñalvo, C. Vargas, and R. Cárdenas,** "METHODOLOGY GIS-BASED FOR BIOMASS LOGISTIC AND TRANSPORT OPTIMISATION."
- D. Alfonso, C. Perpiñá, A. Pérez-Navarro, E. Peñalvo, C. Vargas, and R. Cárdenas,** "Methodology for optimization of distributed biomass resources evaluation, management and final energy use," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 8, pp. 1070–1079, 2009, doi: 10.1016/j.biombioe.2009.04.002.
- F. Passalacqua et al.,** "Pellets in southern Europe. The state of the art of pellets utilisation in southern Europe. New perspectives of pellets from agri-residues.," 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, no. June 2014, p. 5, 2004.

- G. Thek and I. Obernberger**, “Wood pellet production costs under Austrian and in comparison to Swedish framework conditions,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, no. 6, pp. 671–693, 2004, doi: 10.1016/j.biombioe.2003.07.007.
- M. S. Roni, D. N. Thompson, and D. S. Hartley**, “Distributed biomass supply chain cost optimization to evaluate multiple feedstocks for a biorefinery,” *Applied Energy*, vol. 254, no. July, p. 113660, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113660.
- O. Sun and N. Fan**, “A Review on Optimization Methods for Biomass Supply Chain: Models and Algorithms, Sustainable Issues, and Challenges and Opportunities,” *Process Integration and Optimization for Sustainability*, vol. 4, no. 3, pp. 203–226, 2020, doi: 10.1007/s41660-020-00108-9.
- “**Phyllis2**- Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, microand macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar.” <https://phyllis.nl/> (accessed Jul. 28, 2021).
- R. L. Graham, B. C. English, and C. E. Noon**, “A Geographic Information System-based modeling system for evaluating the cost of delivered energy crop feedstock,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 18, no. 4, pp. 309–329, 2000, doi: 10.1016/S0961-9534(99)00098-7.
- R. Zailan, J. S. Lim, Z. A. Manan, S. R. W. Alwi, B. Mohammadi-ivatloo, and K. Jamaluddin**, “Malaysia scenario of biomass supply chain-cogeneration system and optimization modeling development: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 148, no. June, p. 111289, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111289.



# ISOLANTI TERMICI NANOTECNOLOGICI: OPPORTUNITÀ O INADEGUATEZZA PER LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DELL'ESISTENTE

**Alessandra Cernaro<sup>1</sup>, Ornella Fiandaca<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria, Università di Messina, Italia, [alessandra.cernaro@unime.it](mailto:alessandra.cernaro@unime.it)

<sup>2</sup>Dipartimento di Ingegneria, Università di Messina, Italia, [ornella.fiandaca@unime.it](mailto:ornella.fiandaca@unime.it)

## ABSTRACT

La qualità energetico-ambientale dell'ecosistema ha richiesto riflessioni rivoluzionarie in campo politico, progettuale, produttivo, esecutivo e di validazione. Il contributo fornito dall'isolamento termico degli edifici evidenzia come occorra una sinergia che negli ultimi anni è stata individuata nella predisposizione di incentivi statali, nella concezione di sistemi a cappotto quali soluzioni trainanti nella progettazione dell'intervento di riqualificazione energetica, nella innovazione tecnologica dei prodotti di coibentazione, nella predisposizione di protocolli di esecuzione e verifica. La nostra indagine ha riguardato gli isolanti non convenzionali, ricercando soluzioni per cappotti che si avvalgono di nanotecnologie, rispondono ai criteri ambientali minimi (CAM) e a specifiche normative in termini di prestazione. Il censimento condotto ha quindi riguardato nano/micro cappotti che si avvalgono di principi attivi differenti in VIRTÙ della loro concezione, noti come VIP (Vacuum Insulation Panel), Aerogels e rivestimenti termoriflettenti. Sull'efficacia della capacità isolante di queste categorie di prodotti, reclamizzate anche per i minimi ingombri, abbiamo rilevato posizioni di scetticismo motivate sulla base delle conoscenze fisico-tecniche sinora acquisite: è messa in dubbio la possibilità di eguagliare in pochi millimetri (5-30) l'efficacia garantita da diversi centimetri (4-16) di soluzioni convenzionali. I prodotti di punta, campionati sulla base delle migliori prestazioni attestate, sono stati applicati nell'ipotesi di efficientamento energetico di un blocco del quartiere INA CASA a Messina realizzato su progetto di Fiippo Rovigo negli anni '50, con tecniche costruttive tradizionali e una chiusura verticale in mattoni forati fra le maglie di una struttura in cemento armato. La validazione delle prestazioni che, per l'accesso all'eco-incentivo, deve garantire il salto di due classi energetiche, è stata effettuata con Termus, un applicativo BIM dell'ACCA. I risultati offrono parte della risposta agli interrogativi di efficacia posti per questo spaccato di innovazione tecnologica.

**Keywords:** Isolanti nanotecnologici, Superbonus 110%, Classificazione energetica, BIM (Building Information Modelling), INA Casa

## INTRODUCTION

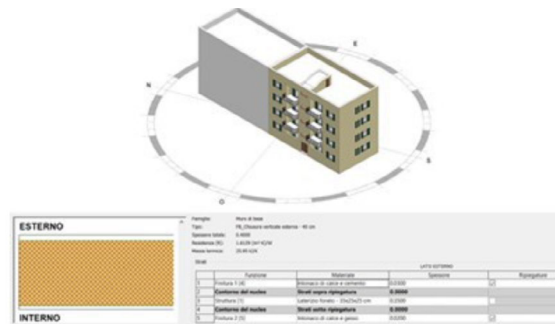
Alla ricerca di nuove soluzioni per la riqualificazione energetica: il dibattito apertosi al patrimonio edilizio realizzato nel secondo dopoguerra ha nei confronti della riqualificazione energetica una predisposizione naturale. Nell'attesa delle prime norme sul risparmio energetico degli anni '70, ma anche nel ventennio successivo, la concezione di un involucro non rispondeva PIÙ alla trasmissione del calore in VIRTÙ dell'inerzia, come avveniva con i sistemi costruttivi in muratura, non beneficiava della sperimentazione del primo Novecento (pur con i limiti manifesti) e doveva "standardizzarsi" per sopperire velocemente all'urgenza di ricostruzioni ed espansioni urbane. Nelle maglie dei sistemi intelaiati ormai diffusi si ricorreva a murature in laterizio forato o con intercapedine, ritenendo questa stratificazione minimale garanzia di benessere termoigrometrico. Nonostante i concetti di qualità ambientale cominciassero a circolare, le soluzioni non erano certo raffinate e polimeriche. L'aria, quale miglior isolante, era l'unico presidio che si riteneva inglobato nella parete a fronte delle dispersioni invernali; per il comportamento estivo, l'inerzia era superata da pareti leggere di spessore dettato dalla produzione di blocchi forati. Sebbene i primi impieghi di strati isolanti risalgano agli anni '30-'40 [Bertolazzi, 2017], occorrerà attendere l'ultimo ventennio del secolo per assistere a un'adozione diffusa. Nel contempo il benessere termoigrometrico, prevalentemente invernale, veniva garantito da impianti di riscaldamento che si diffusero in modo capillare.

Le incentivazioni promosse dal 2020, nel rilanciare il settore dell'edilizia, hanno quindi lo scopo di favorire l'adeguamento termico del patrimonio edilizio, in primo luogo quello dell'intervallo temporale 1945-1970, per assenza di coibentazione, ma altresì quello realizzato fra il 1970 e le normative che hanno fissato soglie per i parametri fisico-tecnici (ANIT, 2020), inadeguato a rispettarne i valori prescritti. Questo spaccato architettonico sembra non essere investito da dibattiti sul valore storico-architettonico e su problemi di conservazione per cui la proposta di applicare un sistema a cappotto all'involucro potrebbe non essere interdetta da dichiarazioni di interesse culturale con conseguente apposizione di vincolo. Ma anche laddove la qualità architettonica non fosse incompatibile con gli interventi trainanti previsti per accedere agli incentivi statali, pensare di minimizzare le opere edili potrebbe comunque essere un'opportunità da contemplare.

Avendo affrontato lo studio del quartiere di edilizia popolare INA Casa realizzato a Messina, sul sedime del Fondo Basile, negli anni '50 a firma autorevole di Filippo Rovigo, le precedenti riflessioni hanno trovato un banco di prova per confrontare

soluzioni tradizionali o innovative, non prima di aver attraversato il dibattito aperto fra sistemi a cappotto e le diverse alternative che si stanno addensando sul panorama delle opzioni possibili. Un modello BIM metterà in evidenza lo stato dell'arte tecnico-costruttivo dell'involucro, punto di partenza per valutare PIÙ SCENARI di riqualificazione energetica nell'accezione richiesta dagli incentivi statali (Fig. 1).

La ricerca di nuove soluzioni di isolamento termico si è imbattuta nella confusione attualmente esistente fra le diverse denominazioni “commerciali” e “propagandistiche” riferite a microcappotti, nanocappotti, cappotti sottili e/o nanotecnologici, VIP, nanorivestimenti termoriflettenti, rasanti/pitture/vernici/materiali isolanti nanotecnologici proposti come sinonimi o comunque senza alcuna chiarezza espositiva e prestazionale



**Figure 1.** Quartiere INA CASA dell'ex Fondo Basile (Messina): dal modello BIM l'originaria stratigrafia dell'involucro.

**Source:** Elaborazione delle autrici

Si è imposta quindi l'esigenza di comprendere l'origine di ciascuna espressione e di giungere a una classificazione per questi prodotti analogamente a quanto fatto per gli isolanti che trovano applicazione nei sistemi a cappotto “convenzionali”, così intendendo tutto ciò che ha superato lo scetticismo degli operatori edili ed è stato sistematizzato sulla base della derivazione compositiva: vegetale, animale, minerale, sintetica.

A questo spaccato produttivo, infatti, a partire dai primi anni del XXI secolo, si sono affiancati prototipi a basso spessore, definiti “non convenzionali” in VIRTÙ di tecnologie sperimentali e a costi sostenuti finalizzate a ridurre la trasmissione del calore per conduzione e/o convezione e/o irraggiamento. Pochi hanno varcato la soglia della produzione industriale ma, negli ultimi anni, sono stati fondamentali per lo sviluppo di ulteriori ricerche volte alla miniaturizzazione delle particelle e/o dei pori, rivoluzionando il panorama prestazionale con l'introduzione di principi termofisici non

ancora recepiti a pieno per valutarne il funzionamento, vero o presunto, effettivo o soltanto dichiarato [Bjorn, 2011; Duca, Ronzoni, 2018].

In tal senso si è attraversato il dibattito che attualmente vede contrapposti produttori e consorzi di isolanti “convenzionali” ai “non convenzionali”, senza prendere parte ma solo provando ad adottare gli strumenti “ingegneristici”, requisiti, normative, comparazioni virtuali, sperimentazioni, per contribuire alla comprensione di questo nuovo upgrade tecnologico.

### **Nanocappotti, microcappotti, nanoresine. Un po' di chiarezza**

Nel condurre una verifica sullo stato dell'arte degli isolanti “non convenzionali” si è riscontrata un'anarchia terminologica che non aiuta a organizzare categorie concettuali utili nella individuazione di problemi, scelta delle soluzioni, diffusione della conoscenza. Alcune denominazioni individuano, pur con qualche improprietà, le dimensioni dei componenti nano e/o micro, altre il principio attivo e la natura chimica, o altrimenti la tecnologia produttiva. Occorre quindi definire con coerenza il tipo di prodotto isolante, individuando quali siano i parametri identificativi di descrizione.

La derivazione del nome di questi sistemi a cappotto innovativi, e forse una parte dell'ambiguità, riguarda il processo produttivo adottato che consente di miniaturizzare le particelle e/o i pori. Tale espediente si è univocamente definito “nanotecnologia” se pure deve essere fatta una distinzione fra nano e micro, che non sono sinonimi ma si riferiscono all'ordine di grandezza che può essere rispettivamente 10-9 mm o 10-6 mm o comparire nella composizione con una variabilità che comprende l'intero intervallo. Si chiariscono in tal modo le diverse denominazioni riscontrate.

Nella pubblicistica scientifica e nella documentazione tecnica si legge poi che il loro funzionamento non riguarda unicamente la conduzione del calore ma coinvolge principi fisico-tecnici aggiuntivi per l'accoppiamento di altri materiali (riflettenti, opacizzanti) e/o tecnologie (sottovuoto, stratificazione) che intervengono su: convezione, irraggiamento e ancora sulla conduzione. Pertanto, occorrerebbe un approfondimento sui criteri di valutazione del comportamento termico di questi prodotti innovativi per capire in cosa dovrebbero differire da quelli utilizzati per i cappotti termici convenzionali. Ovviamente questa verifica richiede un contraddittorio con quanto dichiarato dalle aziende che reclamano l'incongruenza di questa innovazione produttiva e valutazioni prestazionali analitiche e sperimentali sulla base di principi normalizzati; esigenza avvertita diversamente a seconda del principio attivo sul quale

si fonda il funzionamento, che ci ha portato a individuare tre classi di isolanti termici nanotecnologici “non convenzionali” per cappotti sottili:

- Aerogels;
- Vacuum Insulation Panels;
- Rivestimenti termoriflettenti.

Ad oggi, per poter accedere agli incentivi statali, occorre che i prodotti commercializzati siano scelti non solo in virtù della migliore prestazione energetica ma anche se in possesso dei seguenti requisiti legati a specificità di concezione e produzione:

Rispondenza ai CAM Criteri Ambientali Minimi (DM 11/10/2017) per attestarne il profilo ecosostenibile [ANIT, 2021];

Dichiarazione di Prestazione (DoP-Declaration of Performance) o marcatura CE (Regolamento UE n.305/2011); in assenza di quest’ultima o se la dichiarazione di prestazione non fornisce i valori asseriti dal produttore occorre determinarli in accordo al DM 02/04/1998 “Modalità di certificazione delle caratteristiche e delle prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti ad essi connessi” [ENEA, 2020];

Conformità alla normativa di riferimento per il calcolo delle conduttività, dichiarata e di progetto (UNI EN ISO 6946:2018 “Componenti ed elementi per edilizia Resistenza termica e trasmittanza termica Metodi di calcolo” che si rifà alla UNI EN 10456:2008, dedicata alla valutazione della conduttività dichiarata  $\lambda_D$  e di progetto a partire da quella dichiarata e definisce un metodo per il calcolo in caso di assenza di marcatura CE) [ANIT, 2020].

Il repertorio selezionato per lo studio ha avuto alla base dell’inclusione queste condizioni, imprescindibili per legge, indipendentemente dall’opportunità, ancora non intrapresa, di individuare parametri di valutazione differenti per queste, tutte o alcune soluzioni di isolamento termico non convenzionale. In subordine si sono prese in esame le distinzioni introdotte sulla base dei principi attivi e degli spessori forniti.

### **La produzione di isolanti nanotecnologici: principi attivi, prestazioni, sostenibilità e idoneità ai requisiti del superbonus 110%**

La nanotecnologia adottata per la produzione di queste categorie di isolanti termici non convenzionali deriva dalla ricerca spaziale, per proteggere le navicelle spaziali

dal calore estremo che devono affrontare nei viaggi di rientro (+ 1200 gradi) e dalle bassissime temperature dello spazio esterno all'atmosfera terrestre (-240 gradi).

Il trasferimento in edilizia ha creato una ostilità nel mercato convenzionale a fronte della diffusione di mercati paralleli in cui pochi millimetri di uno strato di finitura sembrava potessero competere con dimensioni dieci-venti volte superiori dei cappotti tradizionali, in virtù di aggettivazioni superlative ma in mancanza di dichiarazioni di efficacia supportate da schede tecniche normalizzate,. Più di recente sembra che il mercato si stia stabilizzando aprendo ad aziende e prodotti che per selezione naturale hanno portato attestazioni supportate da dichiarazioni di prestazioni DoP, marcature CE, rispondenza ai CAM; tuttavia rimangono ancora da promuovere programmi di ricerca e sperimentazione che stabiliscano per gli isolanti nanotecnologici criteri di valutazione non necessariamente identici a quelli tradizionalmente e in prevalenza basati sul più basso valore di conducibilità termica  $\lambda$ .

I vantaggi indiscussi derivabili dall'introduzione delle soluzioni a basso spessore, qualora efficaci, sarebbero quelli di evitare la sostituzione di imbotti degli infissi e delle soglie, di non ridurre la larghezza di accessi e pertinenze esterne e, nei confronti dei fabbricati circostanti, di non incidere notevolmente sulle distanze minime.

In termini di sostenibilità, se è pur vero che si riduce la quantità di risorse materiali e si incrementa la qualità energetico ambientale nell'uso, poco ancora è noto a proposito dell'energia di produzione, della loro durabilità e del fine vita se pure qualche segnale si intravede nell'uso di materiali riciclati e riciclabili.

La ricerca effettuata in ambito produttivo, guardando al contesto italiano e vagliata attraverso le condizioni precedentemente poste, ha restituito un repertorio non particolarmente ampio di nano e/o microcappotti. Un primo censimento ha consentito di prendere confidenza con potenzialità e limiti di ciascuna categoria e di affrontare una comparazione prestazionale (Tab. 1).

| Prodotto [Azienda]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Requisiti per accedere al Superbonus                                                                                                                                                                       |                                                                                                      |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Principio attivo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | CAM                                                                                                                                                                                                        | $\lambda_D$ (W/m·K)                                                                                  | DoP          |
| Spessori di produzione                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                            | [Norma]                                                                                              | CE           |
| Altri indicatori                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                      |              |
| Nano/micro cappotti - Pannelli stratificati                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                      |              |
| Aeropan e Aeropan Fast [Ama Nanotech]<br>STRATO: Aerogel di silicio nanoporoso rinforzato con fibre di vetro parzialmente riciclate (Amagel A2)<br>SUBSTRATO: Polipropilene armato con fibre di vetro stampato a caldo su materassino Amagel A2<br>Il pannello Aeropan Fast viene fornito prerassato con rete in fibra di vetro annegata.<br>s = 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60 mm | Asserzione ambientale<br>autodichiarata del<br>30.06.2020<br>verificata il 13.07.2020<br>[ISO 14021]                                                                                                       | 0.015<br>[EN 12667]                                                                                  | SI<br>SI     |
| Vacunanex Cappotto [Bifire]<br>NUCLEO: Cellule micronizzate di polveri a base di ossidi di silice poste sottovuoto (press. 0.1-0.3 mbar)<br>INVOLUCRO PER SOTTOVUOTO: Lamine di alluminio<br>RIVESTIMENTO: Lastre cementizie di 3 mm (AcquaFire)<br>s= 16 (3+10+3), 21 (3+15+3), 26 (3+20+3) mm                                                                               | Certificazione di Pro-<br>dotto ReMade in Italy*                                                                                                                                                           | 0.004*<br>[UNI EN 10456:2008]                                                                        | n.r.<br>SI   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                            | *Riferita al nucleo. La conduttività utile di calcolo lu della lastra a base cementizia è 0.260 W/mK |              |
| Nanovaku [Nanotecna]<br>NUCLEO: Mix di polveri microporose ultra-pure di silice sinteticamente amorfa, idrofobica e colloidale ad ammassima superficie specifica poste in condizioni di vuoto (valore di pressione non specificato)<br>INVOLUCRO PER SOTTOVUOTO: Film multistrato<br>s= 10, 15, 20, 30 mm                                                                     | Dichiarazione ambien-<br>tale di prodotto Tipo III<br>[ISO 14025]<br>in corso                                                                                                                              | 0.005<br>[UNI EN 10456:2008]                                                                         | n.r.<br>n.r. |
| Nano/micro cappotti - Rivestimenti termoriflettenti <sup>1</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                      |              |
| Tillica [Natural Calk]<br>RASANTE Miscela di grassello di calce stagionato secondo normative UNI EN459-1 e silicio amorfo (aerogel nanotecnologico)<br>FINITURA: Per mantenere le caratteristiche del prodotto, è rigoroso l'uso dei prodotti della linea Natural Calk<br>s = mediamente 5 mm                                                                                 | Asserzione ambiente-<br>le<br>autodichiarata, s.d. (non<br>soggetta secondo il<br>produttore a ve-rifica<br>per assenza di sostanze<br>tossiche certificata con<br>Rapporto di prova<br>eseguita da CATAS) | 0,002<br>[UNI EN 10456:2008]                                                                         | SI<br>SI     |
| Manti Ceramic [Műszer Automatika]<br>RASANTE: Miscela di microsfele ceramiche a granulometria variabile (nano e micro) contenenti aria sottovuoto e rivestite da un materiale speciale che permette loro di riflettere l'onda termica, immerse in un legante non volatile a base acquosa<br>FINITURA: Rete e intonachino<br>s = 2-10 mm                                       | Asserzione ambiente-<br>le<br>autodichiarata del<br>29.07.2020 (non sog-<br>getta secondo il pro-<br>duttore a verifica per<br>assenza di sostanze<br>tossiche certificata con<br>TÜV SÜD)                 | 0.0019*<br>[metodo sperimentale<br>ISA 001/2008]                                                     | n.r.<br>SI   |
| * Ottenuto considerando la somma degli effetti di riflettanza solare (SR=88.4%) e conducibilità termica (0.055 W/mK).                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                      |              |
| Acronimi DoP (Dichiarazione di prestazione); n.d. (non dichiarata); n.r (non reperito); s.d. (senza data).                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                      |              |
| Nota <sup>1</sup> Nella selezione non è stato riportato il rivestimento termoriflettente Afontermo di AfonCasa per carenza di informazioni sulla composizione e sul principio nanotecnologico.                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                      |              |

**Tabella 1.** La selezione rappresentativa di isolanti nanotecnologici per sistemi a cappotto e la valutazione dell'ideoneità ai fini del Superbonus 110%

Fra i prodotti selezionati se ne sono campionati tre sulla base della rappresentatività del principio attivo nonché delle migliori prestazioni energetiche dichiarate per effettuare le simulazioni analitiche con cui testare l'efficacia della riqualificazione energetica e validarne la competitività rispetto agli isolanti termici non convenzionali (Tab. 2).

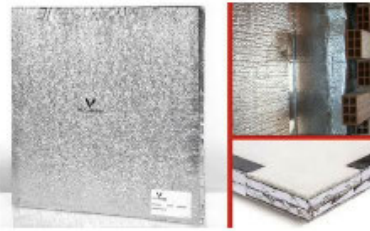
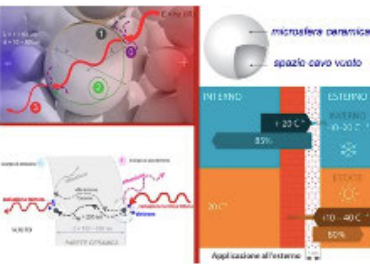
| Prodotto [Azienda]<br>Principio nanotecnologico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Principi termofisici per contrastare il flusso di calore                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AEROPAN [Ama Nanotech]</b><br>I pannelli sono costituiti da particelle di aerogel di silicio nanoporoso al fine di saturare i pori della matrice in fibre di vetro.<br>Tecnologia Amagel A2®.                                                                                                          | <b>CONDUZIONE</b><br>La silice è un cattivo conduttore di calore ed è inoltre presente in bassissima percentuale (2%). La dimensione delle particelle riduce i punti e le superfici di contatto e quindi ulteriormente la trasmissione del calore per conduzione. L'aria presente nei nanopori è da considerarsi secca, perché la silice è idrofobica e altamente traspirante, e contribuisce all'isolamento. <b>CONVEZIONE e IRRAGGIAMENTO</b><br>La dimensione nanometrica dei pori impedisce il movimento dell'aria, che costituisce il 98% del materiale. Essendo l'aria ferma non si avrà trasmissione del calore per convezione e irraggiamento.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>VACUNANEX di Bifire</b><br>I pannelli sono costituiti da un "nucleo" di polveri di silice micrometriche, incapsulato in un "film multistrato" dove viene creato il vuoto a pressioni specifiche (0.1-0.3 mbar).<br>Tecnologia Nanex® e tecnologia del sottovuoto.                                      | <b>CONVEZIONE e IRRAGGIAMENTO</b><br>La tecnologia del sottovuoto impedisce il movimento dell'aria eliminando il contrasto fra le sue molecole e riducendo la trasmissione del calore per convezione e irraggiamento. Un contributo ulteriore lo fornisce la tecnologia Nanex® che riduce le dimensioni dei pori e quindi intrappola aria ferma. Ancora, la presenza, fra le polveri di silice, di materiali opacizzanti oscuri riduce l'assorbimento delle radiazioni infrarosse e quindi trasmissione di calore per irraggiamento attraverso il vuoto. Le lamine di alluminio del film riflettono la radiazione termica infrarossa. <b>CONDUZIONE</b><br>La tecnologia Nanex® che determina una dimensione delle particelle e dei pori nano a micrometrica, riduce i punti e le superfici di contatto e quindi la trasmissione del calore per conduzione. La silice è inoltre un cattivo conduttore del calore.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>MANTICERAMIC di Műszer Automatika</b><br>Il termorasante è composto da microsfele di ceramica, a granulometria variabile dell'ordine del micron.<br>Tecnologia Manti®<br>Effetto combinato di resistenza termica (microsfere ceramiche cave e vuote) e scudo termico (riflettanza del rivestimento)  | <b>IRRAGGIAMENTO</b><br>La trasmissione del calore per irraggiamento è inibita dal contributo prevalente generato dal trattamento riflettente delle pareti delle microsfele ceramiche, sia esterne che interne. Le prime, intercettano la radiazione infrarossa incidente e la riflettono innescando fenomeni di smorzamento per via delle stesse azioni indotte nelle particelle contigue. La radiazione trasmessa entro la cavità vuota per effetto di riflessioni multiple riduce la sua entità. Il calore assorbito dalle pareti sarà dissipato per emittanza sia verso l'esterno della microsfera che verso l'interno e quindi la radiazione termica smorzata per effetto di fenomeni di riflessione secondari. <b>CONVEZIONE</b><br>Il calore che entra nella cavità non potrà essere trasmesso per convezione perché all'interno della microsfera c'è il vuoto e nessun fluido in movimento. <b>CONDUZIONE e CONVEZIONE</b><br>La radiazione infrarossa incidente sulla parete della microsfera che non viene riflessa o assorbita sarà trasmessa per conduzione alle altre tramite i punti di contatto (ridotti perché le particelle sono sferiche) e per convezione tramite i pori nanometrici presenti fra stesse. La ceramica delle microsfele è un materiale isolante. |

Tabella 2. Principi termofisici di trasmissione del calore dei prodotti campionati.

## Simulazioni BIM per scenari tecnico-economici alternativi

Si è ipotizzato un intervento trainante di riqualificazione energetica con le indicazioni del Superbonus 110% per il blocco B5 del quartiere INA CASA dell'ex Fondo Basile di Messina, ricadente in zona climatica B e quindi con valore massimo della trasmittanza termica di chiusure verticali opache pari a  $0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$  (UNI EN ISO 6946), configurando quattro soluzioni di isolamento a cappotto sull'involucro esistente:

1. EPS grigio; 2. AEROPAN; 3. VACUNANEX; 4. MANTICERAMIC.

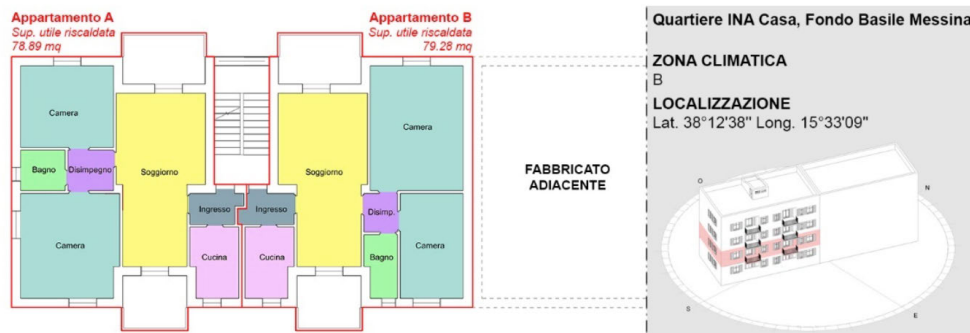
L'ipotesi con EPS grigio è stata introdotta per porre un confronto diretto degli isolanti nanotecnologici con la soluzione convenzionale maggiormente impiegata, il polistirene espanso, e nella sua variante composizionale con grafite, più efficiente per i ridotti valori di conducibilità termica rispetto all'EPS bianco.

La finalità è stata quella di comparare gli spessori da adottare per ottenere un miglioramento da quantizzare in salti di classe energetica oltre che di fabbisogno in kWh/anno. Le simulazioni BIM sono state effettuate con un programma BIM per la modellazione termica, del tipo Termus di Acca®, per verificare attraverso Attestati di Prestazione Energetica APE cosa accade ragionando con uno strumento che riconosce, quale unica componente di valutazione della sua efficienza, la quantità di calore che attraversa per conduzione la stratificazione dell'involucro.

Le applicazioni sono state condotte sui due appartamenti (Fig. 2) di un piano scelto a un livello intermedio nello sviluppo altimetrico del fabbricato, affinché confinasse superiormente e inferiormente con ambienti posti alla stessa temperatura. Sebbene analoghe in termini di metratura e distribuzione funzionale, le due unità immobiliari appartengono, in virtù di collocazione ed esposizione, a due classi energetiche differenti: l'appartamento A, per il quale è maggiore la superficie del prospetto a contatto con l'ambiente esterno, rientra in classe E ( $\text{EP}_{\text{gl,nren}}=68.2560 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ ), a differenza dell'appartamento B collocato in classe D ( $\text{EP}_{\text{gl,nren}}= 58.4994 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ ).

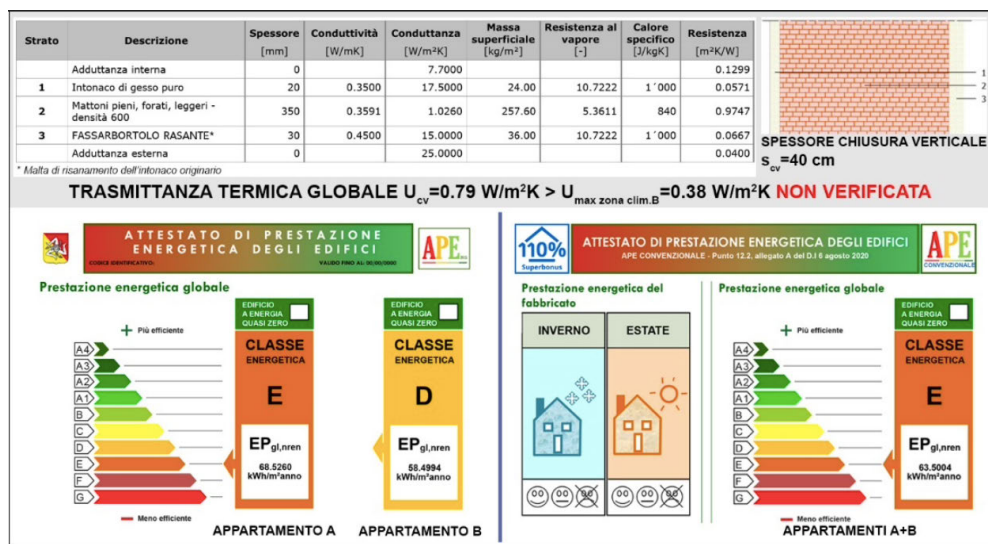
Per ciascuna variante stratigrafica sono stati prodotti gli APE delle due unità immobiliari ma anche il cosiddetto APE convenzionale che, ai fini dell'accesso al Superbonus 110%, valuta la prestazione energetica globale dell'edificio e non del singolo appartamento; in questo studio, per ragioni di semplicità, è stato circoscritto a un solo piano. Come unico intervento di riqualificazione energetica si è considerata l'applicazione

di un sistema a cappotto, per valutare il contributo da questo derivabile, indipendentemente da ulteriori interventi trainati.

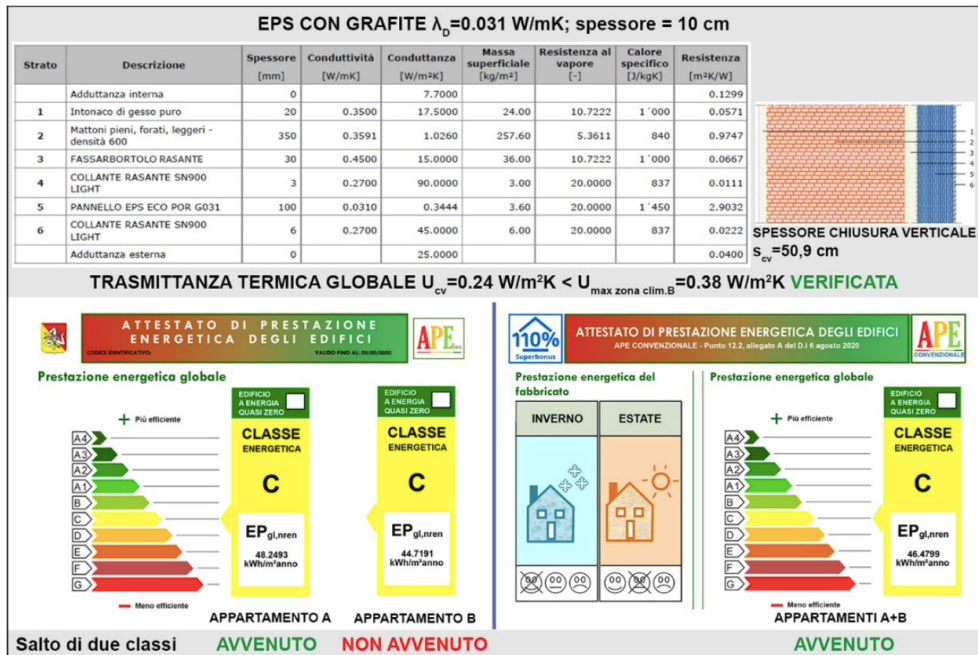


**Figure 2.** Le specifiche dell'unità immobiliare del blocco B5 del Quartiere INA Casa oggetto di attestazione di prestazione energetica. Source: Elaborazione delle autrici.

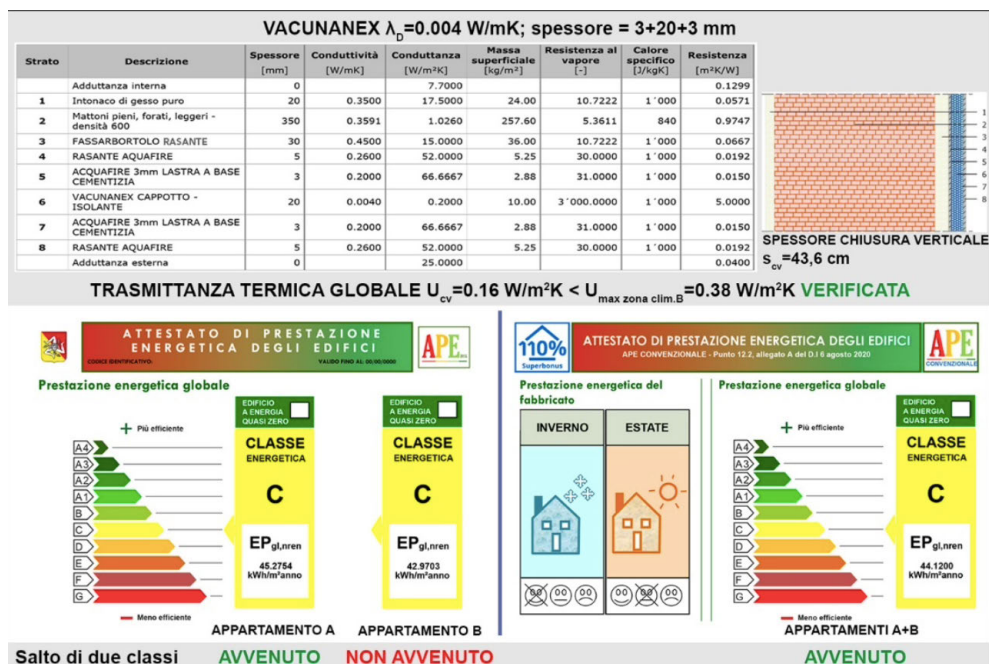
STATO DI FATTO - PARETE MONOSTRATO IN MATTONI FORATI. La classe energetica di partenza dell'intero piano, secondo l'APE convenzionale, è la E ( $EP_{gl,nren} = 68.2560$  kWh/m<sup>2</sup>anno) a causa della peggiore prestazione globale dell'Appartamento A.



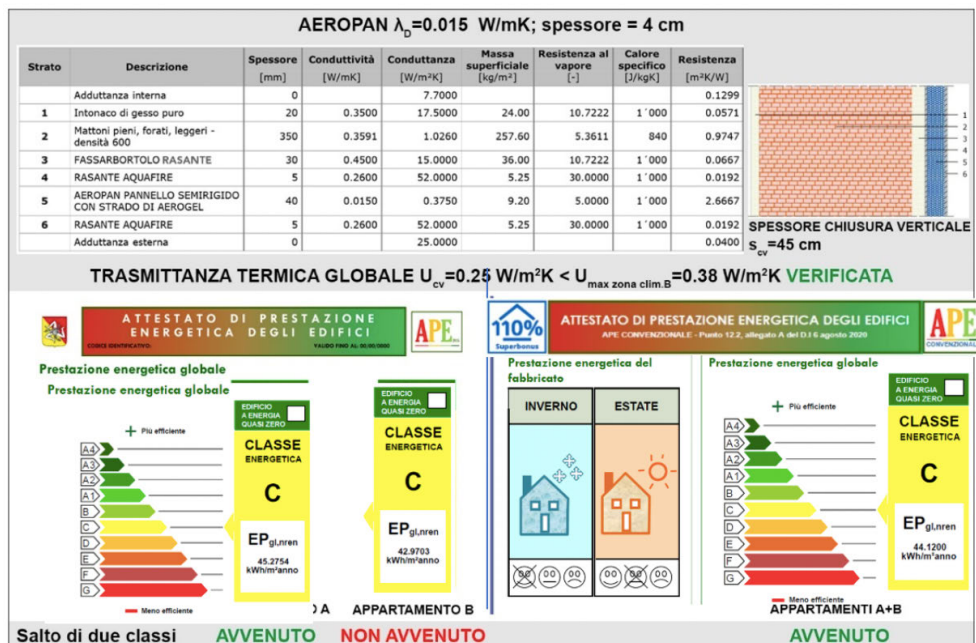
1° SIMULAZIONE- EPS CON GRAFITE. Nell'ipotesi di impiego di un isolante convenzionale in EPS grigio, del tipo ECO POR G031 di Isolconfort ( $\lambda_D = 0.031$  W/m<sup>2</sup>K), il salto di due classi energetiche si è potuto raggiungere con uno spessore di 10 cm.



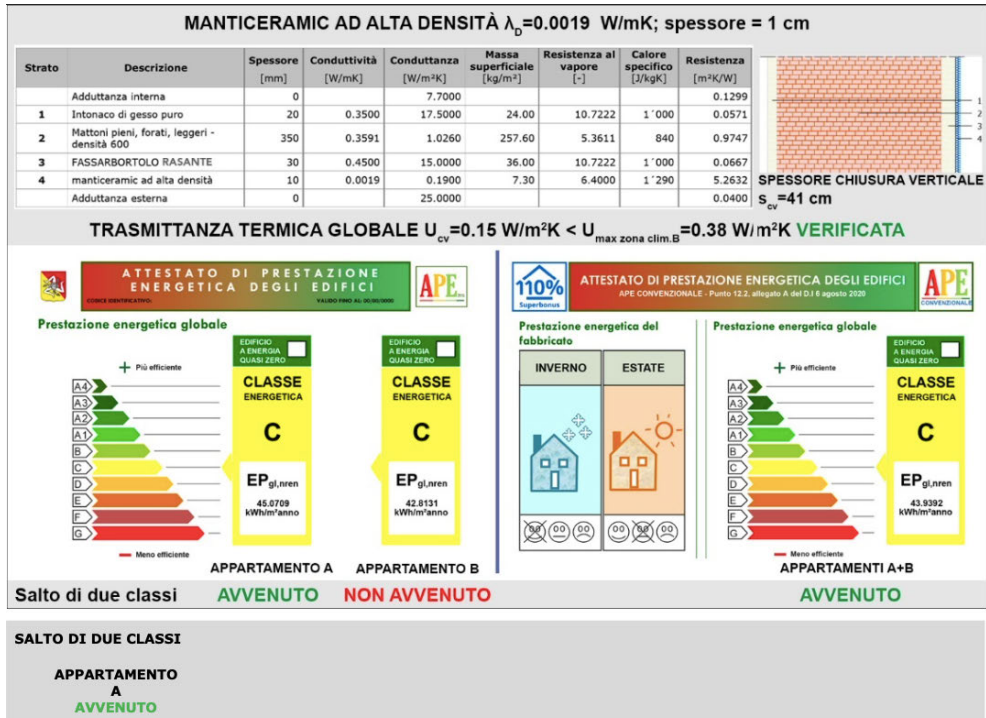
2° SIMULAZIONE – VACUNANEX. Il salto di due classi energetiche per l'appartamento A sarebbe stato già possibile con il minimo spessore in produzione, 3+10+3 mm, ma non per l'unità B, penalizzata dal non aver potuto applicare il nanocappotto sulla parete a nord perché confinante con un fabbricato; la presenza di quest'ultimo tuttavia ha contribuito a far sì che l'appartamento in questione abbia una classe energetica di partenza migliore, ovvero D piuttosto che E. Per superare le verifiche del Superbonus è stato necessario aumentare lo spessore dell'isolante e adottare il successivo della gamma, 3+20+3 mm.



3° SIMULAZIONE - AEROPAN. Il salto di due classi energetiche è avvenuto con uno spessore di 40 mm, il maggiore in produzione. Come nel caso precedente, è avvenuto solo per l'appartamento A; tuttavia anche l'unità B, grazie all'APE convenzionale che è riferito all'intero piano, beneficerà dell'incentivo.



4° SIMULAZIONE - MANTICERAMIC AD ALTA DENSITÀ. Sulla base dei dati ottenuti dall'APE convenzionale, tale prodotto nanotecnologico sembra essere il più innovativo perché con un solo centimetro di spessore, consente il salto di due classi energetiche.



### Potenzialità e limiti in vista di un programma sperimentale

Le analisi condotte possono sintetizzarsi nel prospetto tecnico-economico (Tab. 3), che evidenziano attraverso un calcolo numerico le potenzialità degli isolanti non convenzionali: una risposta energetica efficace a fronte di spessori ridotti, nel rispetto di CAM e delle normative predisposte per gli incentivi statali; a fronte di questo risultato si annota una maggiorazione dei costi non irrilevante, a cui dovrebbe per correttezza sottrarsi il mancato onere di opere edili per ripristinare vani finestre e balconi, accessi e pertinenze.

Il percorso effettuato sulla comparazione di cappotti termici, convenzionali e non, è giunto per gli isolanti termici nanotecnologici a due risultati: la scelta fra quelli filtrati, con esito positivo, dalle norme italiane non è ancora ampia con la conseguente riduzione delle applicazioni anche per i costi elevati cui si può far fronte attualmente grazie all'ecobonus 110%; la diffidenza, dovuta alla confusione terminologica, alle

formulazioni miracolistiche e alla campagna denigratoria dei produttori di isolanti convenzionali, non aiuta a comprendere quanto, la nanotecnologia abbia davvero innovato il settore. A valle di queste considerazioni si ritiene opportuno predisporre, dopo l'applicazione numerica, un programma sperimentale per una conferma o un disallineamento dei dati, e per comprendere appieno il comportamento termofisico dei cappotti non convenzionali.

|                                                                                                                                     | Prodotto                                                                              | Principio                                  | S <sub>isolante</sub>       | U <sub>parete</sub>                                               | APE                                                                 | Risparmio €/mq <sup>1</sup>                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                                                                                                                     | Dimensioni<br>Azienda                                                                 | λ <sub>D</sub> isolante<br>[W/mK]          | S <sub>parete</sub><br>[cm] | [W/m <sup>2</sup> K]<br><0.38 W/m <sup>2</sup> K<br>(zona B - ME) | convenzionale<br>EP <sub>gl,nren</sub><br>[kWh/m <sup>2</sup> anno] |                                               |
| SDF                                                                                                                                 | /                                                                                     | /                                          | /                           | 0.79                                                              | Classe E                                                            | /                                             |
|                                                                                                                                     |                                                                                       |                                            | 40                          | non verificata                                                    | 63.5004                                                             |                                               |
| SIMUL. 1                                                                                                                            | Eco POR G031<br>1000x500 mm<br>Isolconfort                                            | EPS grigio<br>0.031                        | 10<br>49.9                  | 0.24<br>verificata                                                | Classe C<br>46.4799                                                 | 26,8%<br>12,12                                |
| SIMUL. 2                                                                                                                            | Vacunanex cappotto<br>1000x600 mm<br>600x500 mm<br>600x100 mm<br>200x100 mm<br>Bifire | VIP<br>0.004                               | 2.6*<br>43.6                | 0.16<br>verificata                                                | Classe C<br>44.1200                                                 | 30.5%<br>145,00<br>170,00<br>350,00<br>700,00 |
|                                                                                                                                     |                                                                                       |                                            | *3+20+3mm                   |                                                                   |                                                                     |                                               |
| SIMUL. 3                                                                                                                            | Aeropan<br>1400x720 mm<br>Ama Nanotech                                                | Aerogel<br>0.015                           | 4<br>45                     | 0.25<br>verificata                                                | Classe C<br>46.8684                                                 | 26.2%<br>329.70                               |
| SIMUL. 4                                                                                                                            | Manticeramic<br>ad alta densità<br>Múszer Automatika                                  | Rivestimento<br>termoriflettente<br>0.0019 | 1<br>41                     | 0.15<br>verificata                                                | Classe C<br>43.9392                                                 | 30.8%<br>129.00                               |
| Acronimo SDF (Stato di fatto) Nota <sup>1</sup> Costo valutato per lo spessore che ha garantito il salto di due classi energetiche. |                                                                                       |                                            |                             |                                                                   |                                                                     |                                               |

**Tabella 3.** Prospetto tecnico-economico delle simulazioni ipotizzate

## CONCLUSIÓN

Potenzialità e limiti in vista di un programma sperimentale

Le analisi condotte possono sintetizzarsi nel prospetto tecnico-economico (Tab. 3), che evidenziano attraverso un calcolo numerico le potenzialità degli isolanti non convenzionali: una risposta energetica efficace a fronte di spessori ridotti, nel rispetto di CAM e delle normative predisposte per gli incentivi statali; a fronte di questo risultato si annota una maggiorazione dei costi non irrilevante, a cui dovrebbe per correttezza sottrarsi il mancato onere di opere edili per ripristinare vani finestre e balconi, accessi e pertinenze.

Il percorso effettuato sulla comparazione di cappotti termici, convenzionali e non, è giunto per gli isolanti termici nanotecnologici a due risultati: la scelta fra quelli filtrati, con esito positivo, dalle norme italiane non è ancora ampia con la conseguente riduzione delle applicazioni anche per i costi elevati cui si può far fronte attualmente

grazie all'ecobonus 110%; la diffidenza, dovuta alla confusione terminologica, alle formulazioni miracolistiche e alla campagna denigratoria dei produttori di isolanti convenzionali, non aiuta a comprendere quanto, la nanotecnologia abbia davvero innovato il settore. A valle di queste considerazioni si ritiene opportuno predisporre, dopo l'applicazione numerica, un programma sperimentale per una conferma o un disallineamento dei dati, e per comprendere appieno il comportamento termofisico dei cappotti non convenzionali.

|                                                                                                                                                   | <b>Prodotto</b><br><b>Dimensioni</b><br><b>Azienda</b>                                | <b>Principio</b><br><b><math>\lambda_D</math> isolante</b><br><b>[W/mK]</b> | <b>Sisolante</b><br><b>[cm]</b><br><b>Sparete</b><br><b>[cm]</b> | <b><math>U_{parete}</math></b><br><b>[W/m<sup>2</sup>K]</b><br><b>&lt;0.38 W/m<sup>2</sup>K</b><br><b>(zona B - ME)</b> | <b>APE</b><br><b>convenzionale</b><br><b><math>EP_{gl,nren}</math></b><br><b>[kWh/m<sup>2</sup>anno]</b> | <b>Risparmio €/mq<sup>1</sup></b><br><b>energetico</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>SDF</b>                                                                                                                                        | /                                                                                     | /                                                                           | /                                                                | 0.79<br>non verificata                                                                                                  | Classe E<br>63.5004                                                                                      | /                                                      |
| <b>SIMUL. 1</b>                                                                                                                                   | Eco POR G031<br>1000x500 mm<br>Isolconfort                                            | EPS grigio<br>0.031                                                         | 10<br>49.9                                                       | 0.24<br>verificata                                                                                                      | Classe C<br>46.4799                                                                                      | 26,8%<br>12,12                                         |
| <b>SIMUL. 2</b>                                                                                                                                   | Vacunanex cappotto<br>1000x600 mm<br>600x500 mm<br>600x100 mm<br>200x100 mm<br>Bifire | VIP<br>0.004                                                                | 2.6*<br>43.6                                                     | 0.16<br>verificata                                                                                                      | Classe C<br>44.1200                                                                                      | 30.5%<br>145,00<br>170,00<br>350,00<br>700,00          |
| <b>SIMUL. 3</b>                                                                                                                                   | Aeropan<br>1400x720 mm<br>Ama Nanotech                                                | Aerogel<br>0.015                                                            | 4<br>45                                                          | 0.25<br>verificata                                                                                                      | Classe C<br>46.8684                                                                                      | 26.2%<br>329.70                                        |
| <b>SIMUL. 4</b>                                                                                                                                   | Manticeramic<br>ad alta densità<br>Müszer Automatika                                  | Rivestimento<br>termoriflettente<br>0.0019                                  | 1<br>41                                                          | 0.15<br>verificata                                                                                                      | Classe C<br>43.9392                                                                                      | 30.8%<br>129.00                                        |
| <b>Acronimo SDF</b> (Stato di fatto) <b>Nota</b> <sup>1</sup> Costo valutato per lo spessore che ha garantito il salto di due classi energetiche. |                                                                                       |                                                                             |                                                                  |                                                                                                                         |                                                                                                          |                                                        |

**Tabella 3.** Prospetto tecnico-economico delle simulazioni ipotizzate

## ACKNOWLEDGEMENTS

Si ringrazia l'ing. Carmelo D'Angelo per il supporto con il software Termus dell'Acca.

## REFERENCES

- ANIT** (2020). Materiali isolanti e Superbonus 110%. Ricavato 5 Maggio, 2021, da <https://www.anit.it/materiali-isolan-ti-e-superbonus-110/>
- ANIT** (2021) CAM e Superbonus 110%. Ricavato 10 Giugno, 2021, da <https://www.anit.it/pubblicazione/cam-e-superbonus-110/>
- Bertolazzi, A.** (2017). Gli isolanti termici (1920-1940). Milano: Franco Angeli
- Bjorn, P. J.,** (2011). Traditional, state of the art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities [Versione elettronica]. Energy and Building, 43, 2549-2563.

Documentazione tecnica, fornita dalle aziende e/o reperita dai siti web: Aeropan, Aeropan Fast di Ama Nanotech [aeropan.it]; Eco POR G031 di Isolconfort [isolconfort.it]; Manticeramic di MÚSZER Automatika [manticeramic.it]; Nanovaku di Nanotecnica [nanotecnica.it]; Tillica di Natural Calk [tillica.ch]; Vacunanex di Bifire [vacunanex.it].

**Duca, P., Ronzoni, R.** (2018) Sistemi innovativi di isolamento termico a confronto: Vacuum Insulated Panels, Phase Change Materials, Materiali termoriflettenti. Tesi LM in Architettura-Progettazione Tecnologica e Ambientale, POLIMI, Rel. Prof. A. Campioli.

**ENEA** (2020). Nota sulla prestazione dei materiali isolanti aggiornata al 02.12.2020. Ricavato 1 Giugno, 2021, da [https:// www.efficientzaenergetica.enea.it/images/detrazioni/Avvisi/NOTA\\_ENEA\\_MATERIALI\\_ISOLANTI\\_101220.pdf](https://www.efficientzaenergetica.enea.it/images/detrazioni/Avvisi/NOTA_ENEA_MATERIALI_ISOLANTI_101220.pdf)

---

[1] La prima legge in materia di isolamento termico degli edifici fu la 373/1976, seguita dalla 10/1991. Quest'ultima, all'art. 30, introdusse la certificazione energetica ma non fu mai emanato un decreto attuativo; a tal fine servì attendere il DL 192/2005 quale recepimento della Direttiva 2002/91/CE. Da allora il quadro legislativo è variato per accogliere le esigenze di sostenibilità del settore edile. Con riferimento alla valutazione della prestazione energetica, adesso vige il DL 48/2020 che attua la Direttiva UE 844/2018.

# ANALYSIS AND BEHAVIOR OF DIFFERENT MATERIALS IN SUSTAINABLE CONSTRUCTION AND THEIR ALTERNATIVES FOR THE IMPROVEMENT OF THE ENVIRONMENT

**Javier Cárcel-Carrasco<sup>1</sup>, Aurora Martínez-Corral<sup>2</sup>, Jangveer Kaur<sup>3</sup>, Jaime Llinares-Millán<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Universitat Politècnica de València (Spain). Email: [fracarc1@csa.upv.es](mailto:fracarc1@csa.upv.es)

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de València (Spain). Email: [aumarcor@csa.upv.es](mailto:aumarcor@csa.upv.es)

<sup>3</sup>Universitat Politècnica de València (Spain). Email: [jankau@arq.upv.es](mailto:jankau@arq.upv.es)

<sup>4</sup>Universitat Politècnica de València (Spain). Email: [jllinares@csa.upv.es](mailto:jllinares@csa.upv.es)

## ABSTRACT

The construction sector is widely known for its growing activity and its impact on the environment. The use of different materials within the world of construction has evolved over the years. Thus, thanks to technology, it has been possible to achieve an improvement in the behaviour of certain materials in the world of construction. In this article, different materials from this sector are analysed in order to achieve an improvement and awareness towards a more sustainable construction. The focus has been on the study of the behaviour of these materials and their responses to the phases of construction. As analysed, it has been possible to demonstrate that the controlled evolution of certain materials such as the use of clinker or cementite, significantly improves the context of sustainable construction. On the other hand, by replacing cement by other materials such as fly ash or slag can improve the durability by 50% which is a high figure related to the sustainable point of view, thus can reduce the impact on the environment.

**Keywords:** Sustainability, construction, ecological materials.

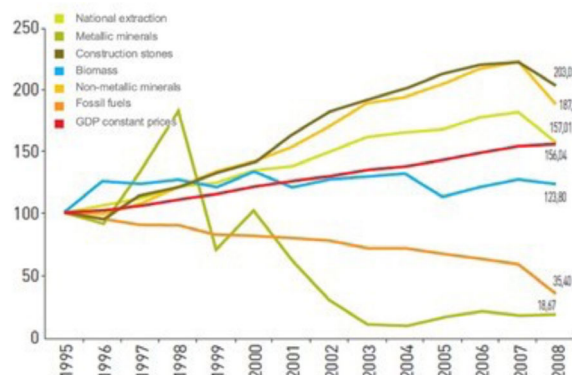
## INTRODUCTION

Currently there are many activities that turn out to be unfavorable for the environment, however those that stand out are from the industrial sector, transport along with the construction sector (Wieser *et al.*, 2021), which through several factors ends up affecting the environment in a negative way. On the other hand, it is worth mentioning the awareness of the environment in recent years, and this can be seen by increasing studies aimed exclusively at factors that affect the environment, therefore it can be said that the perception regarding traditional construction is changing towards a more ecological and sustainable future (del Río Merino *et al.*, 2009). De-

spite understanding the negative effect, it is still necessary to implement measures and regulations that regulate the current system of materials management within the field of construction and demolition. The world of construction is also known for its impact on the environment both by the process of building and the materials used (Coelho and de Brito, 2012). This article analyzes the various building materials and their impact on the environment along with the study of how to improve the current system.

In the case of Spain, the field of construction and demolition is one of the economic engines (Duarte and Bielsa, 2011), it is so much that the economy of this country is linked to the trends of the construction sector, which has been verified after the crisis of 2006. The negative points related to the field of construction are due to several factors, being the most important the use of the materials used in it and the final stage of them (Sandin *et al.*, 2014). This last point is mainly due to the demolition phase where the materials are deposited mostly untreated for other use. The result of the unfavorable impact of the construction sector can be seen in climate change, deforestation, loss of biodiversity (“EU Biodiversity Strategy for 2030”).

These effects on the environment are mostly due to the use of materials along with the energy used in the process. In order to reduce these impacts on the environment, it is necessary to understand the concept of sustainable materials, since they are those that generate less environmental impact (Miller and Ip, 2013). Being materials, whose origin is natural, it makes them both materials with high potential to be recycled. This virtue makes its impact not as serious as traditional materials. Sustainable materials also have a low amount of energy used both in the extraction process and throughout the life of the materials (Xundi *et al.*, 2010). Energy waste is found mainly in materials that are heavily handled and have little recycling potential.



**Figure 1.** Evolution of National extraction and other factors represented in a period of time of 14 years.  
**Source:** OBSE (Spanish Observatory of Sustainability) (Miller and Ip, 2013).

## MATERIALS AND METHODS

To obtain data on the behavior of the different materials, the different characteristics of the materials and their impacts on the environment in general have been studied. Both the production and the end of these materials have been taken into account. However, for the present study, data have been collected on relevant points such as energy consumption, the impact on the greenhouse effect, and the ozone layer along with its potential to be recycled.

These characteristics were collected using databases available in INE (National Institute of Statistics) ("INEbase/ Industria, energía y construcción / Construcción y vivienda") and Statista ("U.S. construction industry statistics & facts | Statista") along with others cited in this paper. This data is intended to evaluate and make users aware of a variety of building materials. After analyzing these factors, it is intended to reach the results to the agents involved in the construction and demolition sector for their subsequent dissemination to users. Moreover, it is necessary to take into account the generation of waste from construction and demolition, since being in large quantities, it affects the environment directly and indirectly, depending on the composition of the C&D (Construction and demolition) waste and can be toxic in some cases (Duan *et al.*, 2019). By not being treated correctly, they create waste that ends up in landfills where the potential of these materials is completely lost. Another element to consider is the transport involved in the process of taking the waste to the treatment plants, in most cases located far from the site where the waste is generated.

## STUDY CASE

The study of materials is very useful to know also the behavior of the energy involved in the process. With the extraction of raw materials energy is wasted in large quantities and to this, we must add the use of energy once the building is already built, this is the reason why it is necessary to know certain materials. Next, the materials are studied in order to conclude at the results within the field of construction and demolition. In order to understand the price and use of building materials, it is important to know the types of materials used in construction. Thus, according to the manufacture of materials, There are three types of materials which are natural, transformed, and mixed ("Building Materials – Types and Uses in Construction", 2020).

The first category corresponds to materials that do not require specific treatment to be used in the work since they behave properly without the need for treatment after

extraction. In the second place are the transformed materials therefore they are artificial materials since to be able to use in the work they require treatment for their correct operation. Finally, there are mixed materials, and as the name suggests they are materials that have a natural origin but for their proper functioning require the use of artificial elements that complement their correct use within the field of construction. In Table 1 it can be seen the materials depending on their source and type:

| TYPES       | DESCRIPTION                                                                 | TYPES                                       |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Naturals    | No need for post extraction treatment                                       | Cork, stone, wall, aggregates in general    |
| Transformed | Materials manipulated for proper functioning                                | Concrete, plastics, and synthetic materials |
| Mixed       | Materials of natural source that require complementary materials to be used | Chipboards, BTC among others                |

**Table 1:** Types of materials depending on their manufacturing process.

**Source:** own elaboration with data collected from ("Building Materials – Types and Uses in Construction", 2020)

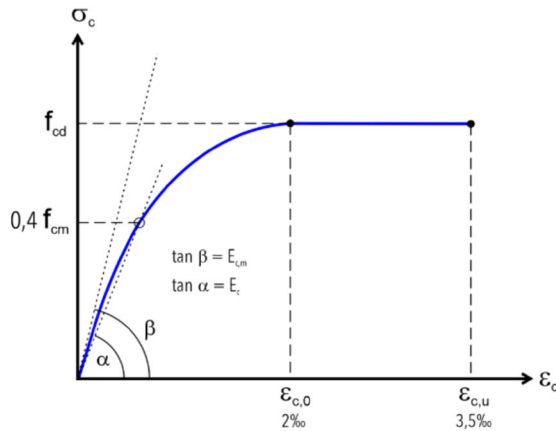
Having the classification criterion of the different materials (indicated in Table 1), it is worth mentioning the energy used in these transformations. In most cases, the energy for the transformation of certain materials comes from non-renewable sources, indicating the negative impact of these activities on the environment.

## Analysis of the materials

The materials selected in this study correspond to those materials that have a high potential to be sustainable, however, at present, they are used massively without taking into account the ecological point of them. Therefore, materials for analysis are traditional materials that can be used in the future with a reduced impact on the environment. Starting with the most used material in the construction sector; concrete.

Currently, the construction sector uses 40% of primary energy ("Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes ScienceDirect"). This also leads to high CO2 emissions. In the case of many constructions or buildings already built, the most used material in this sector is concrete since thanks to its mechanical capacity it makes the process agile and durable. Concrete is a compound of several elements such as cement, aggregates, or chemical additives in order to improve its behaviour and mechanical characteristics ("Stress-strain modelling of reinforced concrete

membrane structures"). In Figure 2, the behaviour of conventional concrete can be observed.

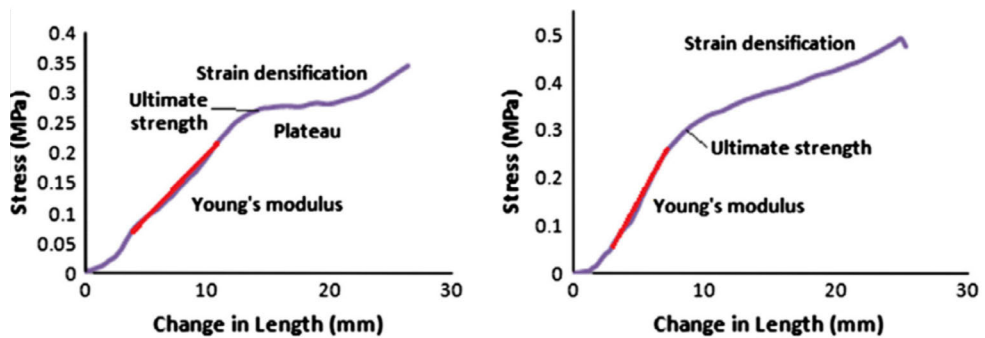


**Figure 2.** Tension and deformation diagram of the concrete.

**Source.** (Sousa and Bogas, 2021).

As can be seen in Figure 2, the main mechanical characteristic of concrete is its compressive strength ( $f_c$ ), which is obtained from the cylindrical specimen break test. On the other hand, the elements that make up the concrete, it is worth mentioning the use of cement, this being the material that produces 8% of the emission of CO<sub>2</sub> worldwide. Taking into account these data, the level of danger of this element can be observed in terms of the path of sustainability.

After knowing these characteristics of the concrete, it is worth knowing the alternative to conventional concrete. In this paper, the analysis will be done on sustainable concrete known as Hemp-lime concrete. This type of concrete is a bio-composite which is made with the core of the wood coming from the plant known as the hemp plant. With the core fiber, it is then mixed with the lime and other additional materials in order to prepare a finished product. In this paper, the focus is on Hemp Concrete which mixes the hemp fiber and the lime. Having these characteristics makes this material a perfect component in the process of improving the current building field by implementing sustainable alternatives. In addition to its sustainable credentials, it is worth knowing the thermal behaviour of this material as it has an excellent performance with high thermal capacity having a medium density and low thermal conductivity which provides the concrete with better insulation capacity. In Figure 3, it can be observed the mechanical capacity of this material:

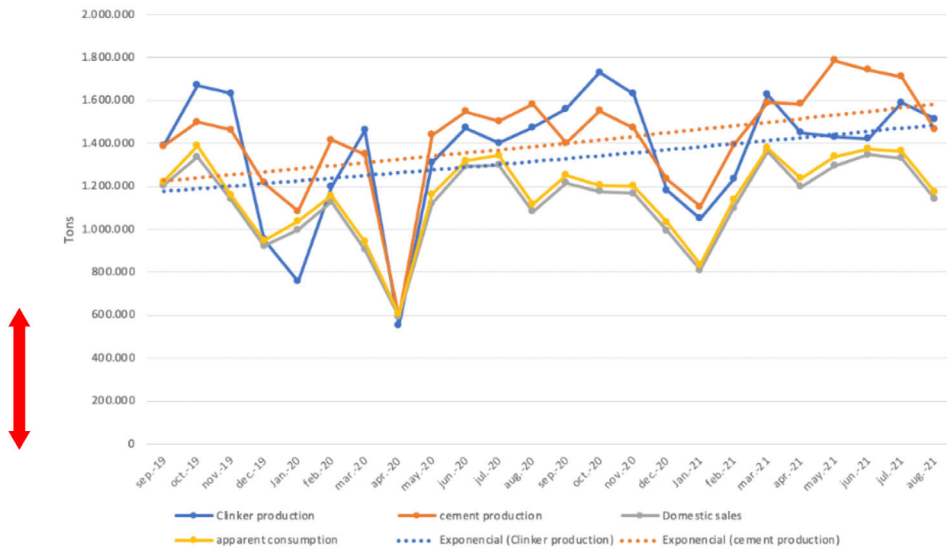


**Figure 3:** Two representative diagrams of the typical behavior of hemp-lime concrete under a compressive axial load. The left figure has a more distinct plateau region (large deformation for a small increase in stress) than the right figure.<sup>16</sup>

LHC has properties that differ from those of conventional concrete. As is the case of the strength of LHC is lower than the conventional building materials. The compressive strength of this material is less than 2 MPa. This low compressive strength, in combination with the low Young's modulus of LHC (Lime Hemp Concrete) indicates the characteristics of this material which can not be used as a bearing wall if it is used as a composite. For this application increased rigidity and higher compressive strength are needed.

## RESULTS AND DISCUSSION

The analysis of these materials leads to studying the current situation of the production of several elements that massively affect the environment. In the case of conventional concrete, it is also worth mentioning the production of Clinker, since being one of the components for the production of cement makes its participation in emissions high ("A review of the properties of hemp concrete for green building applications ScienceDirect). Along with the production of Clinker other elements are represented in Figure 4:



**Figure 4.** The evolution of the production of the different materials along with the consumption and domestic sales of various elements.

**Source:** own elaboration from data collected from [21]

Figure 4 indicates the evolution of the production of the different materials along with the consumption and domestic sales of various elements. The main materials which have been analyzed are Clinker and cement, then they are represented by the tons produced from September 2019 to August 2021. With this data, a prediction can be made for the future of sustainability in terms of the use of concrete in the fields of construction.

It can be observed how in September the production of cement was close to 1400.000 tons however, these values dropped down with the emergence of the pandemic of COVID-19. The rise took place after the pandemic reaching maximum values in the month of April and March of 2021. A very similar trend can be observed in the clinker production, where in September 2019 the values indicate a decrease which dropped down in the pandemic period with more than 50% of reduction in clinker generation. These values raised after the COVID-19 where it took an increase but always with values inferior from the year 2019. As for domestic sales and apparent consumption, it can be observed how the trend of the two parameters follows the same line with a very similar pattern in terms of decreases and increases. It can be observed how the effect of the pandemic has been evident in both consumption and sales, on the other hand, it is worth mentioning the slight decrease in these parameters in terms of the current year (2021). In the study period from September 2019 to August 2021, the maximum figure reached by sales and consumption have been 1400.000 tons

and the minimum values after the pandemic have been 800.000 tons. However, in August 2021 a decrease is shown with the figures that indicate a slight decrease both in consumption and domestic sales.

With the study of these factors, it is clear the high production and consumption of this sector although the prediction indicates a gradual decrease of some components such as the production of both cement and Clinker, however, if the representation is made with a trend through exponential representation, it clearly indicates a rise which will grow for future jobs. Therefore, high demand can lead to unsustainable activities in the construction field. Regarding domestic sales and the demand for materials also makes a negative impact on the environment as the factors involved in these activities are qualified as unsustainable. It is for this reason that awareness must be raised regarding sustainable and ecological materials which help the environment and reduce their massive use.

In order to summarize the differences between conventional concrete and the Hempcrete various factors have been taken into account such as the energy efficiency of these materials, the strength of them, the weight among others. Thus, these characteristics are defined in table 2, indicating the strong point of each material and parameter:

Through this comparison, it can be observed the advantages and disadvantages of both materials studied in this paper. Starting with the conventional concrete, it can be seen the positive impact of this material regarding thermal characteristics which are due to its mass. However, the other factors such as the sustainable side, it can be said the negative impact this material makes on the environment due to its components and the lack of recycling potential. On the other hand, the other material analyzed in the current paper is the hemp-crete, which as its name indicates, is a material with natural source, therefore it presents a high potential regarding sustainable activities. There are many advantages of this material, such as the lightweight of this material or the ability to be recycled in the case of demolition or reusing the product. These comparisons have shown how a natural source material such as Hempcrete can create a positive impact on the environment by using natural fibers and having a very low negative impact on the environment. Along with the various qualities described in table 2. This indicates a possibility of creating an improved construction industry where natural materials can have high potential without creating a negative impact on the environment.

|                    | HEMP-CONCRETE                                                                                                                                                                    | CONVENTIONAL CONCRETE                                                                                                                                                                   |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Source             | Made with a natural material known as hemp. It uses the fibers of hemp, thus it has an sustainable source                                                                        | Concrete is made by mixing other elements such as clinker or cement.                                                                                                                    |
| Energy efficiency  | Thanks to the properties of this material, it creates an comfortable temperature without the massive use of external energy, which saves high quantity of energy.                | Concrete is also known for its high thermal mass which creates an comfortable interior climate improving the energy consumption.                                                        |
| Strength           | Hemp-crete is a resistant material specially resistant to cracks being three times more resistant than the conventional concrete                                                 | The resistance of concrete against cracks from an earthquake is lower than Hemp-crete which indicate an clear lack of better behaviour.                                                 |
| Weight             | As its built with natural fibers it makes the material a light weight compared to other construction materials. Thus, it is 1/7th of the weight of concrete.                     | Concrete is well known for its high weight compared to other construction materials.                                                                                                    |
| Sustainable factor | The main factor of this material is the fact that Hemp-crete can perfectly be recycled after its use in the construction with minor changes unless other construction materials. | The impact of the concrete on the environment is high, this is due to the lack of recycling factor in this material which makes it difficult to reuse and improve the current panorama. |

**Table 2:** Key comparison between conventional concrete and hemp-concrete.

**Source:** own elaboration with data collected from ("Materials demand and environmental impact of buildings construction and demolition in China based on dynamic material flow analysis- ScienceDirect")

## CONCLUSION

The use of energy for the extraction of materials occurs in high quantities. This point makes that in some cases this type of practice manifests itself in an unsustainable way (Xundi *et al.*, 2010). In the case of Spain, it has been possible to see the evolution of the extraction of materials through the Observatory of Sustainability of Spain (Miller and Ip, 2013).

Sustainable constructions are analyzed in order to mitigate the environmental impacts that take place in cities with greater economic and social growth. Along with these growths, it is also worth noting the increase in pollution by air pollutants and the degradation of the ozone layer along with other impacts described in this article. Then the study of the materials is also carried out in order to be able to know the opportunities in the current system of construction and demolition waste management, in addition to promoting and reinforcing the use of green or sustainable ma-

materials to encourage the use of these in current and future constructions. Thus, this article analyzes the most appropriate materials to create a sustainable cycle within the field of construction, therefore it begins by describing the chosen materials and then analyze the behaviors of these materials. Factors such as different types of materials along with their impact on the environment have been considered for the analysis. With the study of these factors, results are reached where the sustainable side of each material and influence on the sustainable cycle are also shown.

## **ACKNOWLEDGEMENT**

This work was supported by the European Union under the project Green Cities for Climate and Water Resilience, Sustainable Economic Growth, Healthy Citizens and Environments with reference 730283 and the framework of Condereff project (Ref. PGI05560-Condereff) Construction & demolition waste management policies for improved resource efficiency.

## **REFERENCES**

- Alwathaf, A. H., Ali, A., Jaafar, M. S., & Algorafi, M. A.** (2011). Stress-strain modelling of reinforced concrete membrane structures. *International Journal of Physical Sciences*, 6(30), 6820-6828.
- Bielsa, J., & Duarte, R.** (2011). Size and linkages of the Spanish construction industry: key sector or deformation of the economy?. *Cambridge Journal of Economics*, 35(2), 317-334.
- Brady, L., & Abdellatif, M.** (2017). Assessment of energy consumption in existing buildings. *Energy and Buildings*, 149, 142-150.
- Coelho, A., & De Brito, J.** (2012). Influence of construction and demolition waste management on the environmental impact of buildings. *Waste Management*, 32(3), 532-541.
- Del Río Merino, M., Izquierdo Gracia, P., & Weis Azevedo, I. S.** (2010). Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered. *Waste management & research*, 28(2), 118-129.
- Duan, H., Miller, T. R., Liu, G., & Tam, V. W.** (2019). Construction debris becomes growing concern of growing cities. *Waste Management*, 83, 1-5.

- European Commission.** Available online on: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda\\_20\\_886](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_886) Hornbostel, C. (1991). Construction materials: Types, uses and applications. John Wiley & Sons.
- Huang, T., Shi, F., Tanikawa, H., Fei, J., & Han, J.** (2013). Materials demand and environmental impact of buildings construction and demolition in China based on dynamic material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 91-101.
- INE.** Instituto Nacional de Estadística. Available online on: [https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/categoria.htm?c=Estadistica\\_P&cid=1254735576757](https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/categoria.htm?c=Estadistica_P&cid=1254735576757)
- Jami, T., Karade, S. R., & Singh, L. P.** (2019). A review of the properties of hemp concrete for green building applications. *Journal of Cleaner Production*, 239, 117852.
- Miller, A., & Ip, K.** (2013). Sustainable construction materials. In *Design and management of sustainable built environments* (pp. 341-358). Springer, London.
- OBSE.** Available online on: <https://www.observatoriosostenibilidad.com/documents/2009%20OS.pdf>
- Sandin, G., Peters, G. M., & Svanström, M.** (2014). Life cycle assessment of construction materials: the influence of assumptions in end-of-life modelling. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(4), 723-731.
- Sousa, V., & Bogas, J. A.** (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127277.
- Statista.** Available online on: <https://www.statista.com/topics/974/construction/>
- Walker, R., Pavia, S., & Mitchell, R.** (2014). Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 340-348.
- Wieser, A. A., Scherz, M., Passer, A., & Kreiner, H.** (2021). Challenges of a Healthy Built Environment: Air Pollution in Construction Industry. *Sustainability*, 13(18), 10469.

**Xundi, D., Liyin, S., Saixing, Z., Jorge, O. J., & Xiaoling, Z.** (2010). Relationship between energy consumption and economic development in the construction industry. *Journal of Engineering, Design and Technology*.

# DISEÑO ÓPTIMO DE UN SISTEMA HÍBRIDO RENOVABLE APLICADO A CAMPUS UNIVERSITARIO EN MÉXICO

Francisco Javier Gómez González<sup>1</sup>, Iván Valencia Salazar<sup>2</sup>, Ángel Pérez-Navarro Gómez<sup>3</sup>,  
Elisa Peñalvo López<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; Tecnológico Nacional de México campus Veracruz; Veracruz, México; [francisco.gg@veracruz.tecnm.mx](mailto:francisco.gg@veracruz.tecnm.mx)*

<sup>2</sup>*Departamento de Ingeniería Eléctrica; Universitat Politècnica de València; Valencia, España; [ivalencias@die.upv.es](mailto:ivalencias@die.upv.es)*

<sup>3</sup>*Instituto de Ingeniería Energética; Politècnica de València; Valencia, España; [anavarro@iie.upv.es](mailto:anavarro@iie.upv.es)*

<sup>4</sup>*Departamento de Ingeniería Eléctrica; Universitat Politècnica de València; Valencia, España; [elpealpe@upvnet.upv.es](mailto:elpealpe@upvnet.upv.es)*

## ABSTRACT

This article shows the application of a methodology for the optimization of a renewable hybrid system applied to the Veracruz campus of the National Technology of Mexico. An algorithm was developed in MATLAB that integrates data from renewable resources, campus demand, and economic information from system components. Two configurations were obtained, one for economic optimization and one for environmental optimization. Of the optimal configurations for the system, the technically most sustainable one increases its cost by 15.6% but reduces CO2 emissions by 23.5% compared to the most economical system.

**Keywords:** Optimization, hybrid renewable system, MATLAB

## INTRODUCTION

Varios estudios se han llevado a cabo a nivel nacional en la BÚSQUEDA de nuevas opciones para la diversificación energética en México. Muchos de estos estudios afirman que el país tiene una gran variedad de alternativas para facilitar una transición energética basada en expandir ampliamente el desarrollo de fuentes renovables tales como la hidroeléctrica y la eólica (Cancino-Solórzano *et al.*, 2016).

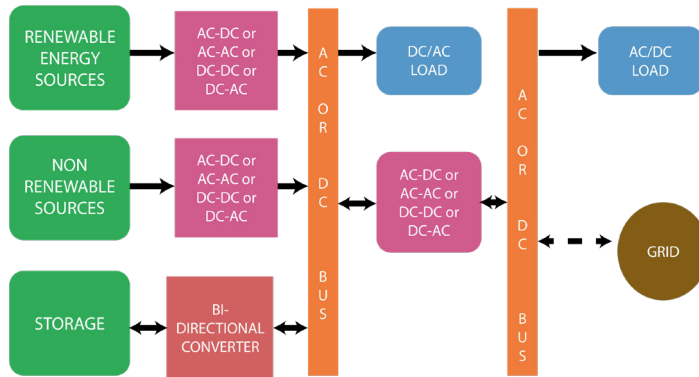
Hasta antes de la pandemia por COVID-19, las grandes instituciones de educación superior, en sus diferentes campus, como el Tecnológico Nacional de México, campus Veracruz, presentaron elevados consumos de electricidad que se reflejaron en sus facturas correspondientes. Lo anterior ha llevado a buscar soluciones que

permitan satisfacer las necesidades parciales o totales de electricidad de los campus universitarios, reduciendo así los consumos de la red. Para contrarrestar los efectos de los altos consumos de electricidad en los costes de la facturación y en las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas, los sistemas híbridos renovables se presentan como una solución que debe considerarse para tal fin. Varios trabajos sobre la aplicación de sistemas híbridos renovables en escuelas, principalmente de zonas rurales, pueden encontrarse en la literatura (Glaisa, Elayeb & Shetwan, 2014) (Lamnadi, Trihi & Boulezhar, 2016).

Un sistema híbrido renovable puede definirse como una combinación de dos o más fuentes de energía renovable/ no renovable. Sus componentes básicos incluyen fuentes de energía (CA/CD), sistema de almacenamiento, convertidores electrónicos de potencia de CA/CD y cargas, como se muestra en la figura 1.

Un sistema híbrido renovable requiere un diseño óptimo en el dimensionado de sus componentes para cumplir con los requerimientos de manera económica, fiable y eficiente. Para la optimización del sistema existen técnicas clásicas como la programación lineal (PL), la programación no lineal (PNL) y la programación dinámica (PD). Las técnicas metaheurísticas aplican algoritmos inspirados en la naturaleza, como los algoritmos genéticos (GA), optimización por enjambre de partículas (PSO), recocido simulado (SA) y colonia de hormigas (AC). También existen técnicas híbridas que combinan dos o más de las antes mencionadas (Ghofrani & Hosseini, 2016).

Se pueden encontrar también herramientas de software que facilitan la tarea de optimizar un sistema híbrido renovable. Una de ellas y quizá la más utilizada es HOMER, un modelo de ordenador desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) de los Estados Unidos para asistir en el diseño de sistemas de micro generación y facilitar la comparación de tecnologías de generación a través de un amplio rango de aplicaciones (Lambert, T. *et al.*, 2006).



**Figure 1.** Componentes de un sistema híbrido renovable

**Fuente:** (Krishna & Kumar, 2015)

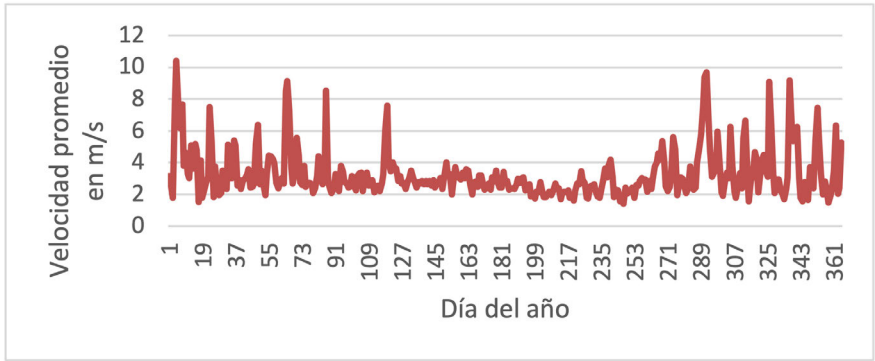
## METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el diseño y optimización del sistema híbrido renovable aplicable al caso de estudio tiene como objetivos:

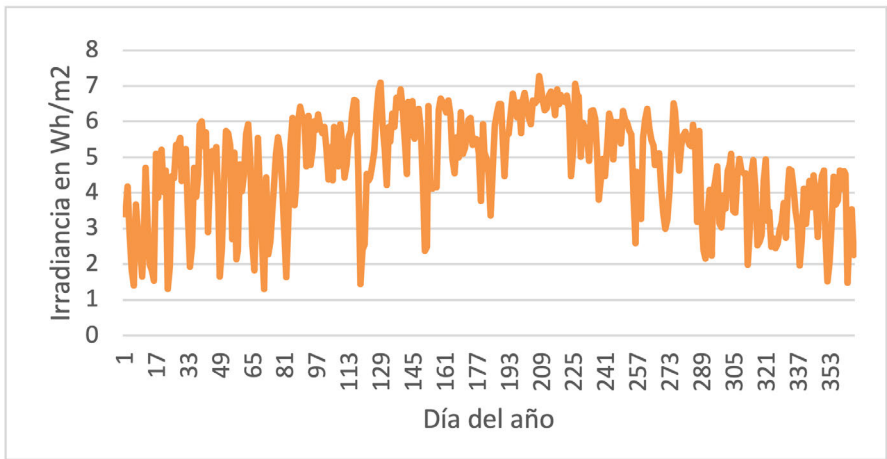
- Caracterizar los recursos renovables disponibles en la región donde se proyectará el sistema.
- Determinar el perfil de demanda eléctrica de la carga a alimentar.
- Proponer una arquitectura para el sistema.
- Definir una estrategia de despacho para la operación del sistema seleccionado.
- Optimizar el sistema utilizando herramientas que consideren criterios técnicos, económicos y medioambientales.
- Caracterización de los recursos renovables.

Para obtener los datos de los recursos renovables presentes en la locación del campus, se utilizaron como referencia las coordenadas geográficas correspondientes, en este caso, latitud de 19,198911° y longitud de -96,161364°. Los recursos solar y eólico se obtuvieron de la plataforma de Predicción de Recurso Energético Mundial (Prediction of Worldwide Energy Resource POWER) de la NASA (NASA, 2018).

De esta plataforma se obtuvo el recurso eólico y solar presente en el sitio del campus en datos horarios y diarios. La velocidad promedio y la irradiancia diarias obtenidas, se muestran en las figuras 2 y 3.



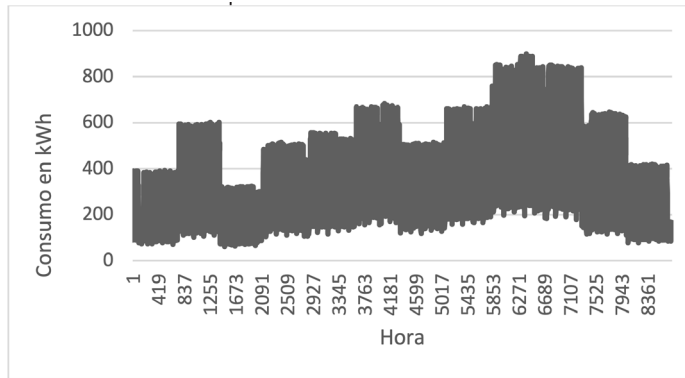
**Figure 2.** Recurso eólico presente en el sitio del campus



**Figure 3.** Recurso solar presente en el sitio del campus

**Estimación del perfil de demanda.**

Para este caso, se instaló un medidor-registrador para medir el consumo de electricidad del campus durante el año 2019, con registros horarios. En la figura 4 puede observarse la gráfica del consumo anual del campus.



**Figure 4.** Consumo anual de electricidad del campus

### Selección del sistema híbrido renovable.

Considerando que el campus cuenta con suministro de energía del proveedor del servicio y los recursos renovables presentes en el sitio, se propone la aplicación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico interconectado a la red. Los componentes utilizados y modelados para la optimización posterior, con sus especificaciones técnicas y económicas, se describen en la tabla 1. La selección de los componentes mencionados tomó en consideración la disponibilidad de éstos en el mercado y su coste, lo que facilita su adquisición.

| DESCRIPCIÓN                               | DATOS                                     |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Especificaciones del módulo FV</b>     |                                           |
| Tipo                                      | ERDM Solar ProPower                       |
| Tecnología                                | Si monocristalino                         |
| $P_{\text{máx}}$                          | 360 W                                     |
| Precio unitario                           | 1,33 USD/W                                |
| Costes de operación y mantenimiento       | 1% del precio                             |
| Tiempo de vida                            | 20 años                                   |
| <b>Especificaciones del aerogenerador</b> |                                           |
| Tipo                                      | Windspot 3,5                              |
| Tecnología                                | Tres palas, contra viento, eje horizontal |
| $P_{\text{máx}}$                          | 3,5 kW                                    |
| Precio unitario                           | 2 285,71 USD/kW                           |
| Costes de operación y mantenimiento       | 3% del precio                             |
| Tiempo de vida                            | 20 años                                   |

**Tabla 1.** Descripción de componentes

Definición de la estrategia de despacho

Ésta se basa en balances de energía y contempla que, en caso que la energía demandada supere la suma de la energía fotovoltaica y la energía eólica en cada una de las 8760 horas anuales, el déficit de demanda será cubierto con la red de suministro. En caso contrario, el excedente generado se inyectará a la red.

Optimización del sistema híbrido renovable

En principio se estableció un espacio de búsqueda para el algoritmo de optimización desarrollado en MATLAB, el cual permitió evaluar un conjunto de M escenarios durante cada una de las 8 760 horas correspondientes a un año. El espacio de búsqueda se aprecia en la tabla 2.

Por su parte, los criterios de optimización pueden ser de carácter técnico, económico y medioambiental. En ellos están involucrados algunos indicadores de fiabilidad y factibilidad del sistema híbrido, los cuales apoyan a los diseñadores en el dimensionado adecuado de los componentes (Fathima and Palanisamy 2015). Los indicadores considerados fueron los siguientes:

| COMBINACIÓN/ESCENARIO | AEROGENERADORES | CONJUNTO FV |
|-----------------------|-----------------|-------------|
| 1                     | 0               | 0 kW        |
| 2                     | 0               | 120 kW      |
| 3                     | 0               | 240 kW      |
| 4                     | 0               | 480 kW      |
| 5                     | 4               | 0 kW        |
| 6                     | 4               | 120 kW      |
| 7                     | 4               | 240 kW      |
| 8                     | 4               | 480 kW      |
| 9                     | 8               | 0 kW        |
| 10                    | 8               | 120 kW      |
| 11                    | 8               | 240 kW      |
| 12                    | 8               | 480 kW      |

Tabla 2. Espacio de búsqueda para el algoritmo de optimización

*Coste Total Anual (CTA). Puede calcularse en términos del coste de capital anual (Capital) y el coste de mantenimiento anual (Mantenimiento) de la siguiente manera (Maleki and Pourfayaz 2015):*

$$CTA = Capital + Mantenimiento \quad (1)$$

Donde:

$$Capital = Nwt * Cwt + Nfv * Cfv \quad (2)$$

$Nwt$  = Número de aerogeneradores.

$Cwt$  = Coste unitario por aerogenerador.

$Nfv$  = Número de módulos fotovoltaicos.

$Cfv$  = Coste unitario por módulo fotovoltaico.

$$Mantenimiento = Nwt * OMwt + Nfv * OMfv + CEC - CEv \quad (3)$$

$OMwt$  = Coste de operación y mantenimiento anual por aerogenerador.

$OMfv$  = Coste de operación y mantenimiento anual por módulo fotovoltaico.

$CEC$  = Coste de energía anual tomada de la red de suministro.

$CEv$  = Coste de energía anual inyectada a la red de suministro.

Se supuso también que el proveedor del suministro eléctrico maneja un esquema de facturación de medición neta (net metering) y que el coste de la energía que se compra es el mismo para aquella que se inyecta a la red. El coste de la energía considerado fue de \$0,07659 USD/kWh, que es el correspondiente a la tarifa GDMTH de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el suministrador del servicio eléctrico en México.

Para convertir el coste de capital inicial en coste de capital anual, se utiliza el factor de recuperación de capital (FRC), dado por (Maleki and Pourfayaz 2015):

$$FRC = \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (4)$$

Donde  $i$  es la tasa de interés y  $n$  es el ciclo de vida del sistema. Para fines de simulación, en este artículo se utilizaron valores de  $i$  y de  $n$  de 9% y 20 años, respectivamente.

**Coste de energía (COE).** Es una medida de factibilidad económica y permite la comparación con el precio de la electricidad generada por otras fuentes (principalmente de la red de suministro) o con el precio existente para la venta de la energía generada. Se calcula simplemente como (Nelson and Kenneth 2016):

$$COE = \frac{\text{Coste Total Anual}}{\text{Producción anual de energía}} \quad (5)$$

**Emisiones anuales de CO2.** Estas se calcularon en términos de la energía consumida de la red de suministro eléctrico y para fines de este artículo se aplicó un factor de emisión de 181 gCO<sub>2</sub>/kWh asociado con la generación eléctrica conectada a la red (Comisión Interdepartamental del Cambio Climático, 2011).

Fracción renovable (FR). Este indicador representa la fracción de demanda eléctrica que se satisface con la energía generada por las fuentes renovables (Hirvonen and Sirén 2018). Se calcula como sigue:

$$FR = \frac{\sum_{t=1}^{8760} E_{Lren}}{\sum_{t=1}^{8760} E_{Lt}} \quad (6)$$

Donde:

$E_{Lren}$  = Demanda eléctrica satisfecha con energía renovable

$E_{Lt}$  = Demanda eléctrica total

Podría establecerse también un coste por kg de emisiones de CO<sub>2</sub>, para contar con un criterio económico-medioambiental que indique el coste óptimo de generación, sin embargo, en México no existe un gravamen que aplique a las emisiones producidas por los sistemas de generación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez modelado y simulado el algoritmo de optimización en MATLAB, los resultados para cada combinación en términos del CTA y el COE se indican en la Tabla 3. Respecto a las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> y la fracción renovable, los resultados se enlistan en la tabla 4.

| COMBINACIÓN/ESCENARIO | CTA (USD) | COE (USD/kW) |
|-----------------------|-----------|--------------|
| 1                     | 203 850   | 0,0766       |
| 2                     | 210 670   | 0,0792       |
| 3                     | 217 520   | 0,0817       |
| 4                     | 232 200   | 0,0868       |
| 5                     | 207 900   | 0,0781       |
| 6                     | 214 720   | 0,0807       |
| 7                     | 221 570   | 0,0832       |
| 8                     | 236 260   | 0,0883       |
| 9                     | 211 950   | 0,0796       |
| 10                    | 218 770   | 0,0822       |
| 11                    | 225 620   | 0,0848       |
| 12                    | 240 320   | 0,0898       |

**Tabla 3.** Indicadores económicos para las distintas combinaciones

De acuerdo con los indicadores económicos, el sistema óptimo corresponde a la primera combinación, que consiste en satisfacer la demanda del campus directamente del suministro de red. Si se desea integrar las energías renovables al suministro con coste mínimo, la combinación 5 indicaría el sistema óptimo, conformado por cuatro aerogeneradores, sin módulos fotovoltaicos.

| COMBINACIÓN/ESCENARIO | EMISIONES ANUALES CO <sub>2</sub> (kg/año) | FR (%) |
|-----------------------|--------------------------------------------|--------|
| 1                     | 481 750                                    | 0      |
| 2                     | 453 700                                    | 5,82   |
| 3                     | 425 660                                    | 11,64  |
| 4                     | 369 580                                    | 23,28  |
| 5                     | 480 760                                    | 0,2038 |
| 6                     | 452 720                                    | 6,02   |
| 7                     | 424 680                                    | 11,84  |
| 8                     | 368 600                                    | 23,48  |
| 9                     | 479 780                                    | 0,4075 |
| 10                    | 451 740                                    | 6,23   |
| 11                    | 423 700                                    | 12,05  |
| 12                    | 367 620                                    | 23,69  |

**Tabla 4.** Indicadores medioambientales para las distintas combinaciones

Respecto a los indicadores medioambientales, el sistema óptimo corresponde a la combinación 12 (8 aerogeneradores y conjunto fotovoltaico de 480 kW), ya que es la que integra un mayor número de unidades de generación renovable al sistema, lo que implica una menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> y por lo tanto, una mayor fracción renovable. Sin embargo, para esta combinación tanto el CTA como el COE se incrementan.

Otra posible alternativa es seleccionar una combinación intermedia que permita contar con una mejor fracción renovable con un incremento razonable de coste. Por ejemplo, la combinación 8 (4 aerogeneradores y conjunto fotovoltaico de 480 kW) permitiría contar con una fracción renovable y nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> similares a las de la combinación 12, pero a un menor coste.

## CONCLUSION

El diseño óptimo de un sistema híbrido renovable es una tarea compleja y a la vez estimulante, debido al NÚMERO de variables que intervienen. Se expuso en este artículo una metodología para el diseño de un sistema híbrido renovable aplicado al campus Veracruz del Tecnológico Nacional de México.

Pudo observarse que una vez concluido el proceso de optimización, la selección del sistema óptimo estará relacionado con el tipo de indicador seleccionado. Se vio que para el sistema óptimo más económico, la fracción renovable es prácticamente despreciable. Por otra parte, el sistema técnicamente más sustentable, incrementa su coste en un 15,6%, pero reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> en 23,5% respecto al sistema más económico.

Se concluye que los resultados del proceso de optimización deben analizarse cuidadosamente para buscar una combinación de componentes que cuente con un equilibrio entre economía y emisiones, resultando así más atractivo a los inversionistas.

## REFERENCES

**Cancino-Solórzano, Y., Paredes-Sánchez, J. P., Gutiérrez-Trashorras, A. J., & Xiberta-Bernat, J.** (2016). The development of renewable energy resources in the State of Veracruz, Mexico. *Utilities Policy*, 39, 1-4.

- Comisión Interdepartamental del Cambio Climático.** (2011). Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Retrieved from <http://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=M-CRST234ZI97531&id=97531>
- Fathima, A. H., & Palanisamy, K.** (2015). Optimization in microgrids with hybrid energy systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 431-446.
- Ghofrani, M., & Hosseini, N. N.** (2016). Optimizing hybrid renewable energy systems: a review. *Sustainable energy-technological issues, applications and case studies*, 161-176.
- Glaiza, K. A., Elayeb, M. E., & Shetwan, M. A.** (2014). Potential of hybrid system powering school in Libya. *Energy Procedia*, 57, 1411-1420.
- Hirvonen, J., & Sirén, K.** (2018). A novel fully electrified solar heating system with a high renewable fraction-Optimal designs for a high latitude community. *Renewable Energy*, 127, 298-309.
- Krishna, K. S., & Kumar, K. S.** (2015). A review on hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 907-916.
- Lambert, T., Gilman, P., & Lilienthal, P.** (2006). Micropower system modeling with HOMER. *Integration of alternative sources of energy*, 1(1), 379-385.
- Lamnadi, M., Trihi, M., & Boulezhar, A.** (2016, November). Study of a hybrid renewable energy system for a rural school in Tagzirt, Morocco. In 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) (pp. 381-386). IEEE.
- Maleki, A., & Pourfayaz, F.** (2015). Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. *Solar Energy*, 115, 471-483.
- NASA** (2018). POWER Data Access Viewer. Retrieved August 30, 2021, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Nelson, V.C., & Kenneth, S.** (2016). Economics. In *Introduction to Renewable Energy* (Second, pp. 357-390). CRC Press.



# EL COVID-19, LA NORMATIVA DE VENTILACIÓN Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN LAS UNIVERSIDADES EN MÉXICO

Iván Valencia Salazar<sup>1</sup>, Elisa Peñalvo López<sup>2</sup>, Joaquín Montañana Romeu<sup>3</sup>, Vicente León Martínez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universitat Politècnica de València, Valencia, España, [ivalencias@die.upv.es](mailto:ivalencias@die.upv.es)

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de València, Valencia, España, [elpealpe@upvnet.upv.es](mailto:elpealpe@upvnet.upv.es)

<sup>3</sup>Universitat Politècnica de València, Valencia, España, [jmontanana@die.upv.es](mailto:jmontanana@die.upv.es)

<sup>4</sup>Universitat Politècnica de València, Valencia, España, [vleon@die.upv.es](mailto:vleon@die.upv.es)

## ABSTRACT

This paper analyses the increase in energy consumption caused by COVID-19 containment measures in university classrooms in Mexico, particularly in hot humid areas where the use of air conditioning units is required. The effect of ventilation on classroom temperature, student comfort and air conditioning equipment consumption are analysed.

**Keywords:** COVID-19, ventilation, energy consumption.

## INTRODUCTION

Uno de las principales estrategias en la lucha contra el COVID-19 es la ventilación adecuada de los espacios. MÚLTIPLES gobiernos y organismos internacionales (UNICEF, 2020) (Ministerio de Sanidad, 2020) han establecido reglamentos y recomendaciones aplicables a los sistemas de ventilación. Todas ellas coinciden en la importancia de la renovación del aire en los espacios cerrados para disminuir el riesgo de contagio entre los usuarios.

En la primera parte del trabajo se compara la normativa relativa a la ventilación en España y México. Posteriormente se analiza el impacto de la ventilación en el Tecnológico Nacional de México campus Veracruz considerando las condiciones climáticas, los consumos de electricidad anteriores y durante la pandemia. En la siguiente etapa se EVALÚAN diferentes escenarios ventilación/consumo energético con el programa Trnsys. En el apartado final se presentan las conclusiones.

## Normativas de ventilación

En esta sección se presentan las características más significativas de las normativas vigentes de ventilación en España y México.

### España

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (Gobierno de España, 2007) establece el caudal mínimo del aire exterior de ventilación para los diferentes tipos de locales y zonas. El Reglamento establece para las escuelas un nivel de renovación de 12,5 l/s por persona. Este mismo nivel de renovación de aire es el recomendado por (Ministerio de Sanidad, 2020). Si bien en el Reglamento se pueden aplicar otros tipos de control de la ventilación que implican un menor caudal en la renovación del aire, tal como las sondas de CO<sub>2</sub>, en el presente trabajo se analiza sólo la renovación de aire a caudal constante.

### México

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-STPS-2008, (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2008) Edificios, locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad, reconoce los importante beneficios que tiene la ventilación para la salud de los trabajadores y usuarios, pero no es de carácter obligatorio. Se limita a realizar las siguientes sugerencias:

*Humedad relativa entre el 20% y 60%;*

*Temperatura del aire de 22,0°C ± 2,0°C para invierno*

*Temperatura del aire de 24,5°C ± 1,5°C para verano*

*Velocidad media del aire inferior o igual a 0,15 m/s, en invierno, y 0,25 m/s en verano.*

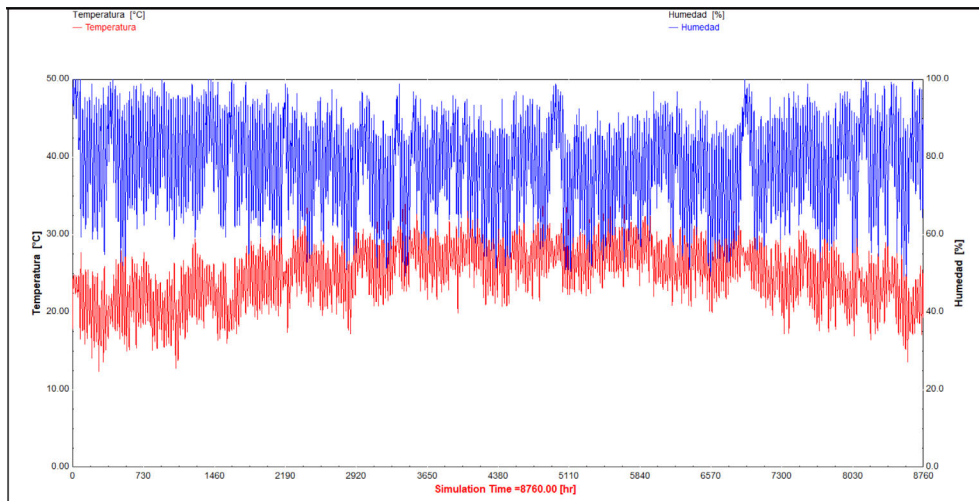
Recomienda al menos 5 renovaciones por hora.

Del análisis de la normativa se deduce que existe un atraso importante en comparación con los países desarrollados, si bien la no exigencia de la ventilación se entiende para reducir costes en la construcción y renovación de espacios climatizados, el establecimiento de temperaturas de consigna con menor impacto ambiental podría llevarse a cabo sin costes adicionales.



con ventanas correderas mientras que el edificio modelo de laboratorios cuenta con ventanas fijas.

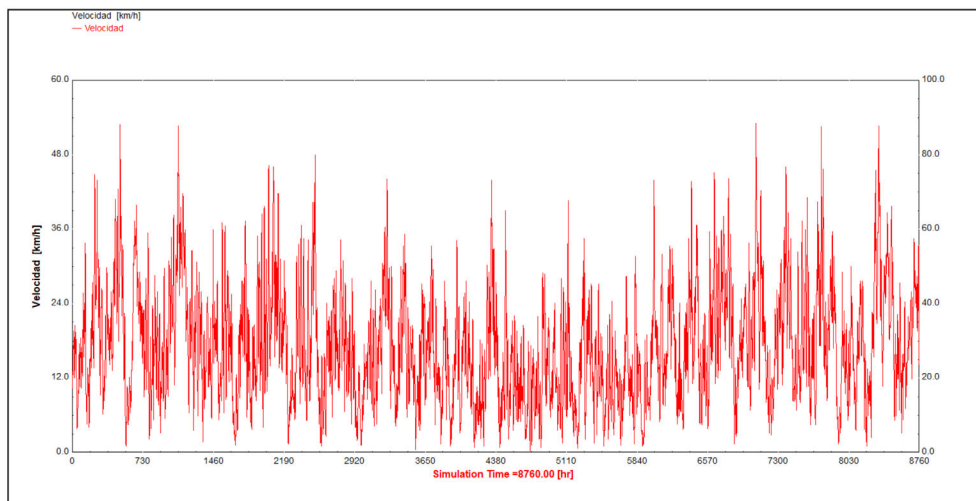
El campus analizado se encuentra en la zona costera del Golfo de México, la evolución de la temperatura y la humedad a lo largo del año se observa en la Figura 2.



**Figure 2.** Evolución anual de la temperatura y humedad en Veracruz, México.

**Fuente:** Elaboración propia con datos de CONAGUA (2021).

En lo que se refiere al viento, se cuenta con un abundante recurso el cual presenta una marcada estacionalidad, los máximo valores se presentan de noviembre a abril; su evolución se observa en la Figura 3.



**Figure 3.** Evolución anual del viento la temperatura y humedad en Veracruz, México.

**Fuente:** Elaboración propia con datos de CONAGUA (2021).

Es común que a lo largo del otoño, invierno y aún en primavera, los frentes fríos generen días muy ventosos con rachas que suelen superar los 100km/h. Por el contrario, en verano, solamente se suelen tener vientos fuertes provocados por huracanes o tormentas tropicales. La ventilación natural cruzada en los edificios del campus se dificulta debido a la intensidad de los vientos y al polvo que suele arrastrar por donde ontrarse este muy cerca de la zona de playas.

### Las aulas y la pandemia

Los edificios de aulas y laboratorios son de dimensiones y características diversas, sin embargo, tienen en común el uso de unidades de aire acondicionado tipo mini split. Los edificios de aulas cuentan con ventanas corredera que permite la ventilación cruzada, mientras que la mayoría de los edificios de laboratorios cuentan con ventanas fijas que impiden la ventilación natural.

Las dimensiones de las aulas suele oscilar alrededor de los 50m<sup>2</sup>, mientras que la densidad de ocupación de las aulas suele ser 0,62 alumnos/m<sup>2</sup>. Para mantener una distancia de seguridad de al menos 1,2m se debe disminuir el ratio a 0,39 alumnos/m<sup>2</sup>, cambio imposible de cumplir en muchos de los casos, obligando a incrementar el número de grupos o bien implementar un sistema híbrido o semipresencial.

El consumo eléctrico anual del campus, el impacto ambiental asociado y el ratio anual de kWh/alumno antes y durante la pandemia se presentan en la Tabla 1.

| CONSUMO                       | 2019  | AÑO PANDEMIA <sup>1</sup> |
|-------------------------------|-------|---------------------------|
| MWh                           | 2.657 | 1.056                     |
| tCO <sub>2</sub> <sup>2</sup> | 1.342 | 533,0                     |
| kWh/alumno <sup>3</sup>       | 531,4 | 211,2                     |

<sup>1</sup>Septiembre 2020- Agosto 2021

<sup>2</sup>(SEMARNAT, 2020) (SEMARNAT, 2021)

<sup>3</sup>Considerando una población de 5.000 alumnos en ambos casos

**Tabla 1.** Consumo eléctrico del campus

Durante el año de pandemia el consumo de electricidad se redujo en 60% comparado con el año 2019, esta disminución se debe a que las clases fueron 100% en línea y a que las oficinas redujeron su operación al mínimo. Aproximadamente el 90% de la reducción se debe a la no operación de los equipos de aire acondicionado, ya que la iluminación tiene un efecto muy reducido debido a que todas las luminarias son tipo Led.

## Consumo eléctrico con ventilación

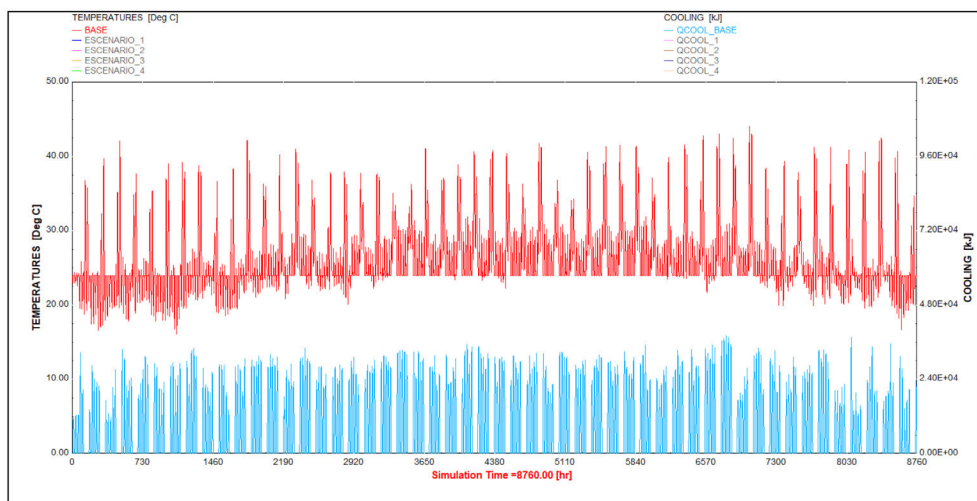
Para evaluar el impacto de la ventilación en el consumo de energía eléctrica del campus se evaluarán los siguientes escenarios:

1. Escenario base
2. Ventilación natural cruzada sin aire acondicionado.
3. Ventilación natural cruzada con aire acondicionado.
4. Ventilación mecánica sin recuperación de calor.
5. Ventilación mecánica con recuperación de calor.

Para el análisis de cada uno de los escenarios se emplea el programa de cómputo Trnsys 16 con un modelo de aula de 50m<sup>2</sup>, una altura de 2,75m, un caudal de 12,5 l/s-alumno, una potencia de refrigeración disponible de 17,58kW y 20 alumnos para mantener la distancia de seguridad. El uso del aula es de 7 a 21 horas de lunes a viernes.

### Escenario base

Como escenario base se considera en el modelo 30 alumnos, 24 grados de temperatura de consigna y no existe ventilación. La evolución de la temperatura en el interior del aula y el consumo eléctrico del equipo de aire acondicionado se muestra en la Figura 4.



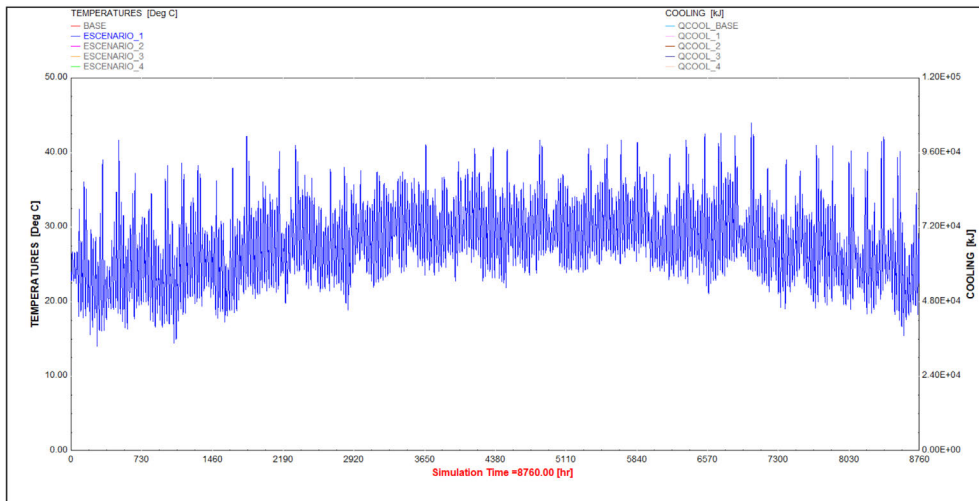
**Figure 4.** Evolución anual de la temperatura y del consumo eléctrico en el aula en escenario base.

**Fuente:** Elaboración propia.

Se observa que el equipo aire acondicionado es capaz de mantener la temperatura de consigna a lo largo del año. En este escenario el campus tiene un consumo anual de electricidad en aire acondicionado de 1.435 MWh equivalente a la emisión de 725 tCO<sub>2</sub>.

### Escenario 1

En este escenario la climatización está apagada y se cuenta solamente con ventilación cruzada. La evolución de la temperatura en el interior del aula en este escenario se muestra en la Figura 5.



**Figure 5.** Evolución anual de la temperatura y del consumo eléctrico en el aula en escenario 1.

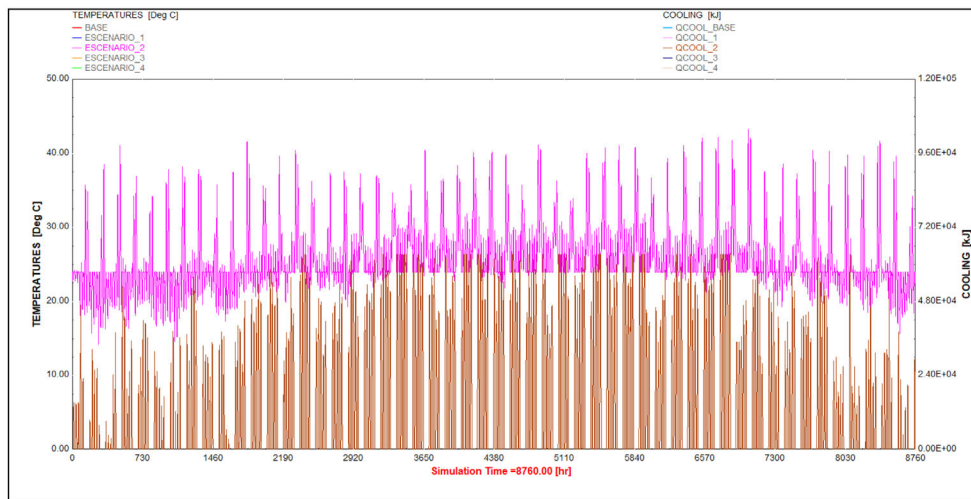
**Fuente:** Elaboración propia.

Se observa que al estar la climatización apagada la temperatura del aula se incrementa considerablemente, en ocasiones por encima de la temperatura ambiente.

Desde el punto de vista energético este escenario es el mejor, ya que el campus reduce su consumo anual de electricidad en 1.435 MWh y en 725 tCO<sub>2</sub> sus emisiones. Desde el punto de vista del confort de los alumnos y trabajadores este escenario no es admisible.

## Escenario 2

En este escenario se considera el uso de la ventilación cruzada y los equipos de aire acondicionado. La evolución de la temperatura en el interior del aula y del consumo eléctrico de equipo de aire acondicionado en este escenario se muestra en la Figura 6.



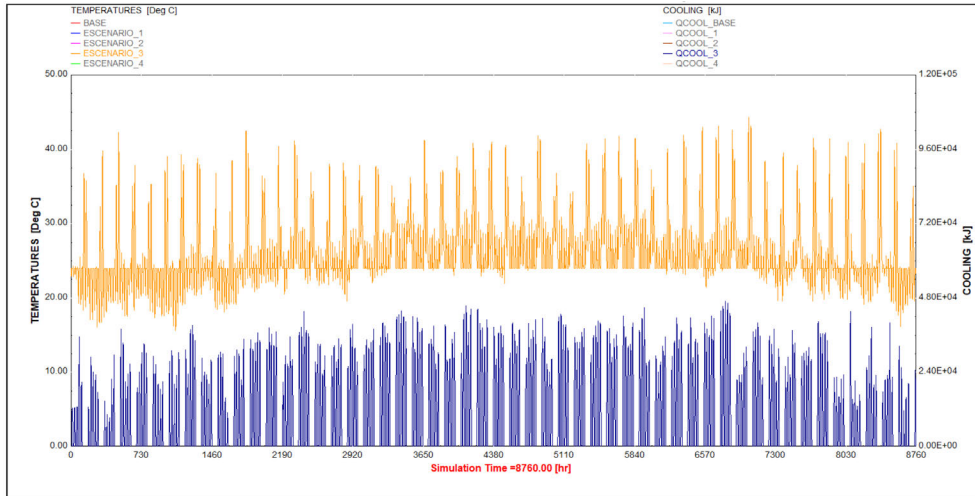
**Figure 6.** Evolución anual de la temperatura y del consumo eléctrico en el aula en escenario 2.

**Fuente:** Elaboración propia.

Se observan en la Figura 6 consumos muy elevados en primavera y verano, se aprecia también que en ocasiones la temperatura de consigna no se alcanza. En este escenario el consumo anual de electricidad en aire acondicionado es de 2.296 MWh equivalente a la emisión de 1.159 tCO<sub>2</sub>.

### Escenario 3

En este escenario se evalúa la instalación de dos extractores de aire en cada espacio climatizado a fin de mantener un caudal de renovación constante a lo largo del día. La evolución de la temperatura en el interior del aula y el consumo eléctrico del equipo de aire acondicionado en este escenario se muestra en la Figura 7.



**Figure 7.** Evolución anual de la temperatura y del consumo eléctrico en el aula en escenario 3.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 7 se observa que el consumo es ligeramente mayor con respecto al escenario base. En este escenario el consumo anual de electricidad en aire acondicionado es de 1.650 MWh equivalente a la emisión de 833 tCO<sub>2</sub>. Considerando 220 espacios climatizados en el campus y un coste promedio de 550 euros por espacio, la inversión total requerida en este escenario es de 121.000€.

## Escenario 4

En este escenario se considera el uso de un recuperador de calor en el sistema de ventilación. La evolución de la temperatura en el interior del aula y el consumo eléctrico del equipo de aire acondicionado se muestra en la Figura 8.



**Figure 8.** Evolución anual de la temperatura y del consumo eléctrico en el aula en escenario 4.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 8 se observa que el consumo es ligeramente menor con respecto al escenario 3, y es aproximadamente un 8% más elevado comparado con el escenario base. En este escenario, el consumo anual de electricidad en aire acondicionado es de 1.550 MWh equivalente a la emisión de 783 tCO<sub>2</sub>.

Considerando que la instalación de recuperadores de calor en los espacios climatizados tiene un coste promedio de 8.700 € por espacio la inversión requerida es 1.914.000 € en este escenario.

## Comparación de escenarios

Se realiza una comparación de los resultados de los diferentes escenarios tomando como referencia el caso base. La Tabla 2 muestra las variaciones anuales en el consumo de electricidad, las emisiones evitadas, el ahorro en la factura eléctrica coste eléctrico y la inversión requerida.

| AHORROS          | ESCENARIO 1 | ESCENARIO 2 | ESCENARIO 3 | ESCENARIO 4 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| MWh              | 1.435       | -2.296      | -1.650      | -1.550      |
| tCO <sub>2</sub> | 725         | -1.159      | -833        | -783        |
| Factura (K€)     | 163         | -261        | -187        | -176        |
| Inversión (K€)   | 0           | 0           | -121        | -1.914      |

**Tabla 2.** Ahorro energético, económico y ambiental en los escenarios simulados en comparación con el escenario base.

Desde el punto de vista de ahorro, el escenario 1 es el más adecuado, pero por cuestiones de confort se descarta. El escenario 2 y 3 presentan resultados económicos similares al final del primer año si consideramos la suma de la inversión y el coste energético adicional. El escenario 4 presenta mejores resultados energéticos, pero requiere de una inversión elevada.

## CONCLUSION

La vuelta a la presencialidad en el TecNM campus Veracruz presenta un gran reto en lo referente a la ventilación adecuada de los espacios, debido principalmente a las características constructivas de los edificios de aulas y laboratorios, la temperatura y humedad del entorno. En el campus Veracruz, con elevado consumo energético en climatización, la instalación de un sistema de ventilación con extractores presenta un mejor equilibrio entre consumo energético adicional e inversión requerida.

## ACKNOWLEDGEMENT

Queremos agradecer a GENERALITAT VALENCIANA y a la Comisión Europea su apoyo en el marco del proyecto DECAB (NÚMERO de subvención GV/2021/149) y del proyecto H2020, SEmPower (GA 847132).

## REFERENCES

- CONAGUA.** (2021). Comisión Nacional del Agua Estaciones Meteorológicas Automáticas. Retrieved 9 01, 2021, from <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- Gobierno de España.** (2007). Real Decreto 1027/2007 Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Retrieved 9 1, 2021, from <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>

**Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.** (2021). Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica- Climatología. Retrieved 9 1, 2021, from <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Mapa>

Ministerio de Sanidad. (2020). Recomendaciones de operación y mantenimiento de los sistemas de climatización y ventilación de edificios y locales para la prevención de la propagación del SARS-CoV-2. Retrieved 9 1, 2021, from [https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/Recomendaciones\\_de\\_operacion\\_y\\_mantenimiento.pdf](https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/Recomendaciones_de_operacion_y_mantenimiento.pdf)

**Secretaría del Trabajo y Previsión Social.** (2008, 11 24). NOM-001-STPS-2008 Edificios, locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad. Retrieved 09 01, 2021, from <http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/nom-001.pdf>

**SEMARNAT.** (2020, 2 27). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional 2019. Retrieved 09 01, 2021, from <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/registro-nacional-de-emisiones-rene>

**SEMARNAT.** (2021, 4 16). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional 2020. Retrieved 9 1, 2021, from <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/registro-nacional-de-emisiones-rene>

**Tecnológico Nacional de México.** (2021). Sistema Nacional de Estadística del Tecnológico Nacional de México. Retrieved 9 1, 2021, from <https://sne.tecnm.mx/public/inicio>

**UNICEF.** (2020). Key Messages and Actions for COVID-19 Prevention and Control in Schools. Retrieved 9 1, 2021, from <https://www.who.int/publications/m/item/key-messages-and-actions-for-covid-19-prevention-and-control-in-schools>

# PLANIFICACIÓN DE DISTRITOS DE ENERGÍA POSITIVA EN FRENTE MARÍTIMOS URBANOS DEL MEDITERRÁNEO.

Isabel Aparisi-Cerdá<sup>1</sup>, David Ribó-Pérez<sup>2</sup>, Tomás Gómez-Navarro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Energy Engineering, Universitat Politècnica de València, València, Spain (IIE).*

*Email: [isap8393@gmail.com](mailto:isap8393@gmail.com)*

<sup>2</sup>*IIE. Email: [david.ribo@iie.upv.es](mailto:david.ribo@iie.upv.es). <sup>3</sup> IIE, Email: [tgomez@dpi.upv.es](mailto:tgomez@dpi.upv.es)*

## ABSTRACT

Los Distritos de Energía Positiva (DEP) se consideran herramientas innovadoras para alcanzar la neutralidad energética y climática en las ciudades. Los DEP son regiones o barrios con un balance energético anual positivo, conseguido principalmente mediante la eficiencia energética y la generación de energía a partir de renovables. Dada su novedad y la falta de metodologías previas, este trabajo pretende aportar una metodología desarrollada para diseñar PEDs en ciudades mediterráneas. Se realiza una auditoría energética para evaluar el rendimiento pasado del distrito. Para el estudio de recursos, se estudian los recursos y el espacio disponibles, así como la madurez de la tecnología y sus costes. A continuación, se obtiene la producción potencial de las tecnologías seleccionadas. Una vez conocida esta información, se plantean las acciones propuestas. Las propuestas conducen a la creación del escenario estratégico que será simulado. Además, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de los posibles cambios en diferentes parámetros.

**Keywords:** Distrito de Energía Positiva; La Marina de València.

## INTRODUCTION

Las ciudades consumen dos tercios del suministro energético, y el 70% de las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen de entornos urbanos, convirtiendo a las ciudades en un agente clave en la transición energética (IEA, 2016). En las estrategias de planificación en las ciudades se están promoviendo los Distritos de Energía Positiva (DEP) para abordar dicha transición. El objetivo de los DEP es lograr un balance energético anual positivo.

Este trabajo aborda las características de los frentes marítimos urbanos (FMU) que los diferencian de otros espacios y su potencial como DEP. Se han analizado los avances en sostenibilidad y eficiencia energética de algunos puertos (Valencia (Autoridad Portuaria de Valencia, 2020), Hamburgo (Acciario, Ghiara, & Cusano, 2014),

Amsterdam (Port of Amsterdam, 2017) y Rotterdam (Port of Rotterdam, 2019) como entornos con puntos en COMÚN con los FMU. Además, se han incluido dos FMU: V&A Waterfront (2019) y Torre Annunziata (Gravagnuolo & Angrisano 2013). Respecto a los puertos, en todos se busca la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> para alinearse con los objetivos europeos del Plan Climat Target. Todos recurren a la producción de energía, ya que en términos de espacio y recursos, suelen ser entornos ricos. Las tecnologías líderes son los paneles fotovoltaicos y los aerogeneradores. La eficiencia está presente, pero no con la misma importancia en todos los casos; además, el interés por la movilidad eléctrica y los combustibles alternativos toman cada vez más relevancia. Además, en la revisión bibliográfica no se ha encontrado una metodología específica.

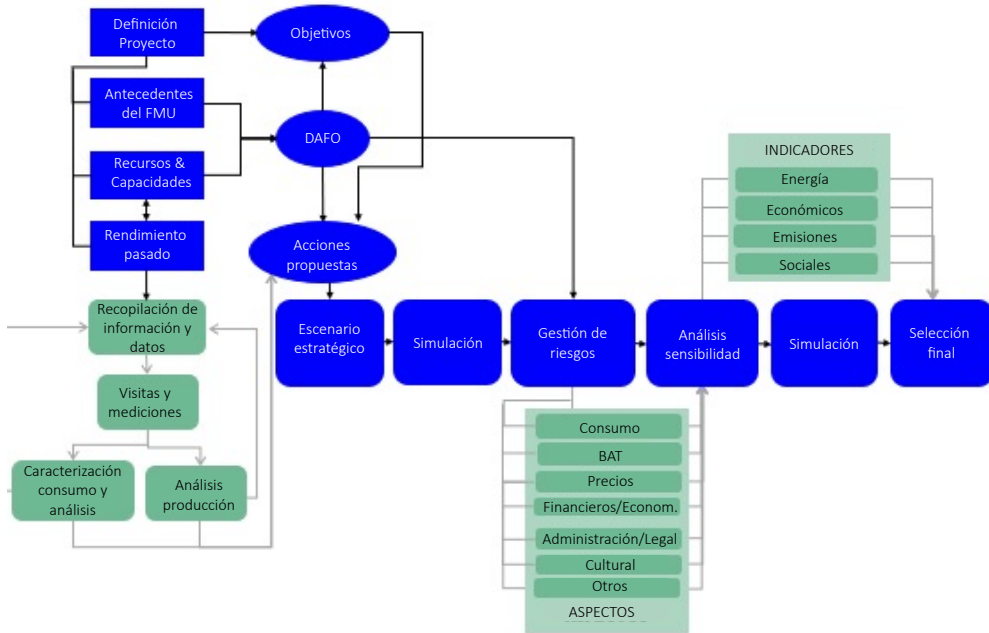
## **METODOLOGÍA**

Se ha desarrollado una metodología para la planificación energética de FMU basada principalmente en la planificación estratégica para la gestión de proyectos (Kerzner, 2001) y el procedimiento de las auditorías energéticas. El primer paso es la definición del proyecto, que implica el estudio de tres puntos principales: Los antecedentes del FMU, Los recursos y capacidades de la zona y el análisis del funcionamiento pasado, de consumo y producción de energía.

El primer punto consta de un procedimiento de entrevistas con las entidades implicadas y una revisión de la literatura, y los dos puntos siguientes requieren un procedimiento más elaborado. El estudio de recursos y capacidades requiere una revisión de las posibles barreras, pero también un proceso más detallado para identificar y cuantificar los recursos renovables. Los principales aspectos en los que se pueden encontrar barreras y que deben evaluarse son los aspectos espaciales, así como los normativos, financieros, tecnológicos, sociales o patrimoniales (Academic Press & Wohlgemuth, 2021).

Los recursos disponibles pueden ser recursos operativos o de gestión o recursos naturales. Los recursos a nivel operativo o de gestión se detectarán en la fase de antecedentes. Los recursos naturales son los recursos disponibles para la generación de energía renovable. En primer lugar se evaluará la disponibilidad de los recursos. Un FMU, puede ser rico en varios recursos, la radiación solar, el viento, el mar, la geotermia o la biomasa; para cada caso concreto, se debe evaluar su disponibilidad. A continuación, se debe evaluar su potencial para la producción de energía en el lugar y su idoneidad en relación con la demanda energética, considerando su viabilidad técnica y económica.

El siguiente paso es la caracterización del consumo, se distinguirá entre demanda térmica y eléctrica. Además, se recopilará información sobre las características del consumo y los datos horarios de un año para realizar simulaciones. Una vez realizado esto, se puede establecer un objetivo y generar un escenario estratégico a partir del mismo. Una vez definido el objetivo, se proponen acciones para alcanzarlo y se seleccionan indicadores representativos para comparar las simulaciones entre sí y determinar adecuación de la propuesta a los objetivos definidos.



**Figure 1.** Metodología para la planificación de DEP.

Una vez definido el escenario estratégico es el momento de simular. Para las simulaciones se utiliza el programa informático HOMER®, ya que proporciona resultados económicos y técnicos que posteriormente servirán para comparar los resultados. Una vez realizada la primera simulación, hay que identificar los riesgos y las variables de incertidumbre. A continuación, se realiza un análisis de sensibilidad introduciendo variaciones en las variables de incertidumbre. Se analizarán las consecuencias de las variaciones introducidas para identificar cuáles afectarían más al proyecto.

## Recursos renovables y potencial de producción solar

Se han diferenciado dos casos de instalaciones de paneles fotovoltaicos en tejados existentes y en estructuras nuevas en zonas de aparcamiento. Se ha utilizado el visor fotovoltaico de la Cátedra de Transición Energética Urbana (Fuster Palop, 2019) para

las instalaciones en cubiertas de edificios. Esta herramienta obtiene la superficie de la cubierta a partir de la información catastral, que se reduce por defecto en un factor del 70% para considerar obstáculos. La relación superficie/potencia utilizada por el visor fotovoltaico es de 10 m<sup>2</sup>/kWp. Así, la potencia máxima se obtiene aplicando:

$$P = A_{roof} \cdot f_{reduc} \cdot r_{area-potencia} \quad (1)$$

Donde  $A_{roof}$  es el área de la cubierta (m<sup>2</sup>),  $f_{reduc} = 0.7$ ,  $r_{area-potencia} = 0.1$  kWp/m<sup>2</sup> y  $P$  la potencia (kWp).

La radiación solar sobre los paneles se estima a partir de un archivo de datos climáticos TMY horarios para Valencia proporcionado por EnergyPlus®, y un modelo isotrópico de radiación.

En las zonas sin edificios donde se propone la instalación de paneles, el número máximo de paneles y la potencia se obtienen de la siguiente manera. Primero, se mide la superficie disponible. A continuación, conociendo la anchura y la longitud del espacio, el ángulo de inclinación de las estructuras para instalar los paneles fotovoltaicos y la potencia de los paneles se obtiene la potencia total para cada zona. Los datos de radiación se obtienen de la página web de PVGIS®.

El patrón de sombras se proyectará sobre el diagrama del recorrido solar. Con el patrón de sombras superpuesto en el diagrama, se puede ver en qué meses y horas el obstáculo impide la llegada de la radiación al punto del tejado analizado. Finalmente, se obtiene la radiación media ponderada. Se obtiene un coeficiente diferente para cada zona con sombras y otro para la zona sin sombras. La ponderación se realiza respecto a la potencia instalada, siendo el coeficiente de cada zona la potencia instalada en esa zona dividida por la potencia total instalada.

En lo que respecta al coste, se requiere un único precio por kWp para considerar una única instalación fotovoltaica para las simulaciones. Hay instalaciones en tejados planos, en tejados inclinados y en estructuras de aparcamientos que tendrán costes diferentes, por lo que se calculará un valor medio ponderado:

$$C_{PVst} = \sum_i^I C_{PVst\_i} \cdot w_i \quad (2)$$

$$w_i = \frac{P_i}{\sum_i^I P_i} \quad (3)$$

Donde  $i$  es el tipo de instalación (coplanar, inclinada o con estructura),  $C_{PVst\_i}$  el coste de la estructura por kWp para el tipo de instalación  $i$ , y  $P_i$  la potencia total de las instalaciones del tipo  $i$ . El coste total por kWp de los paneles fotovoltaicos ( $C_{PV\_total}$ ) que hay que considerar es el coste de los paneles en euros/kWp ( $C_{PV}$ ) más el valor medio ponderado de la estructura.

## Viento

Los datos del viento se han obtenido interpolando los datos de Energy Plus y del IDAE. Energy Plus proporciona las velocidades medias horarias del viento de cada mes para la localidad. Con los datos horarios de velocidades medias de cada mes obtenidos interpolando, se puede establecer si el recurso será suficiente para producir energía con un aerogenerador. Para las simulaciones se utilizarán los datos horarios. La mejor orientación del aerogenerador se determina obteniendo las rosas de viento para la frecuencia, la velocidad, la potencia y la energía.

## Indicadores

Se han seleccionado cuatro indicadores para presentar los resultados de los escenarios, atendiendo a los económicos, de emisiones y energéticos. Hay que señalar que en la simplificación aplicada al caso de estudio se han dejado fuera los indicadores sociales, pero son otro aspecto a considerar en los PD.

-Valor actual neto (VAN): diferencia entre el valor actual de las entradas de efectivo y el valor actual de las salidas durante un periodo de tiempo (€).

$$VAN = NPC_{escenario} - NPC_{ini} \quad (9)$$

$$NPC = \frac{C}{(1+i)^n} - \frac{R}{(1+i)^n} \quad (10)$$

Donde  $C$  son los costes de instalación y funcionamiento a lo largo de la vida del proyecto,  $R$  los ingresos que obtiene a lo largo de la vida del proyecto,  $i$  el tipo de interés real y  $n$  la vida útil.

Coste nivelado de la energía (LCOE): coste medio por kWh de energía eléctrica útil producida por el sistema (€/kWh).

$$LCOE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{served}} \quad (11)$$

Donde  $C_{ann,tot}$  es el coste total anualizado del sistema (€/año). Es el coste actual neto total multiplicado por el factor de recuperación de capital.  $E_{served}$  es la carga eléctrica total servida (kWh/año).

-Producción de energía renovable: la cantidad total de energía eléctrica producida anualmente por los componentes renovables del sistema eléctrico (kWh/año).

-Emisiones de CO2 de la red:

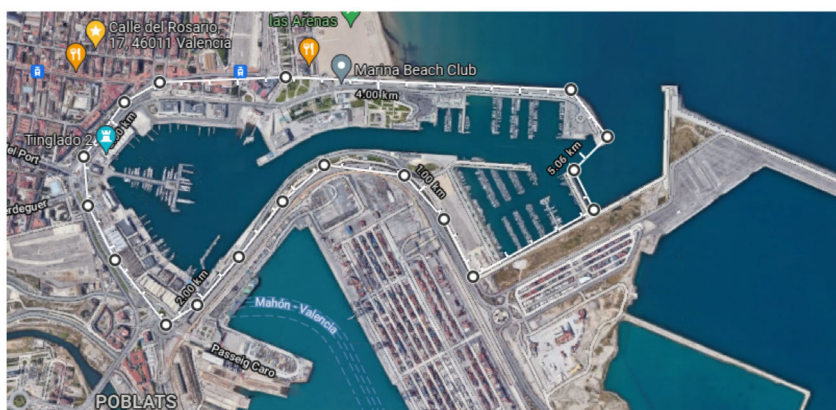
$$CO_2 \text{ emissions} = (E_{purch} - E_{sold}) \cdot f_{co2} \quad (12)$$

Donde  $E_{purch}$  el total de compras a la red,  $E_{sold}$  el total de ventas a la red y  $f_{co2}$  el factor de emisión (g/kWh). Si el sistema vende más energía a la red que la que compra a lo largo del año, las compras netas a la red son negativas, y también lo son las emisiones producidas por la red.

## CASO DE ESTUDIO

### La Marina de València

La Marina de València (LMDV) es un FMU en la ciudad de Valencia. Entre 2007 y 2012, La Marina de València acogió grandes eventos, lo que provocó el rápido desarrollo de sus infraestructuras y la acumulación de deudas. Después, muchas de estas infraestructuras construidas para acoger los dos eventos quedaron sin un uso definido.



**Figure 3.** Mapa de LMDV.

Tras analizar su consumo energético, se comprobó que se debe principalmente a la demanda de electricidad (Fig. 4). El consumo de unas pequeñas calderas para el ACS

son despreciables. Se considerará una medida de eficiencia el cambio de los sistemas de descarga de vapor de sodio o mercurio por la tecnología LED.

Se han recogido los datos de consumo eléctrico mensual de 25 puntos de suministro eléctrico dependientes del Consorcio València 2007. El consumo de LMDV para 2019 fue de 7001 MWh/año. Los principales puntos de consumo se concentran en las zonas de amarre y el alumbrado. Hay puntos de consumo más elevados que otros, algunos con un consumo más diurno, que serán más adecuados para las instalaciones fotovoltaicas, y otros con un consumo más nocturno en función del tipo de demandas vinculadas a ellos. Sin embargo, la curva general es relativamente plana con un mayor consumo nocturno (Fig.4). El consumo no varía mucho a lo largo del año, siendo ligeramente superior de junio a noviembre.

La proximidad al mar Mediterráneo y la escasa rugosidad y disponibilidad de espacio lejos de las ciudades hacen viable la producción de electricidad mediante aerogeneradores. Las condiciones climáticas y la amplia disponibilidad de espacio hacen viable la producción mediante paneles fotovoltaicos. Además, ambas tecnologías son maduras y económicamente competitivas. Además, se considerará el uso de un sistema de almacenamiento con baterías de iones de litio.



**Figure 4.** Perfil de consumo diario.

Para el análisis realizado se ha incluido una estimación de la demanda eléctrica producida por los puntos de recarga de VE en la demanda eléctrica total considerando la previsión del 16% del parque de vehículos para 2030 (Autoridad portuaria de Valencia, 2020) y la información sobre las plazas y horarios de aparcamiento en LMDV. Con la curva estimada para los VE, el consumo anual se incrementará en 1849 MWh, un 26,5% más que el consumo de 2019.

Atendiendo al contexto de LMDV el escenario estratégico planteado es el de mínimo coste, consistente en una gestión eficiente de la energía que permita minimizar

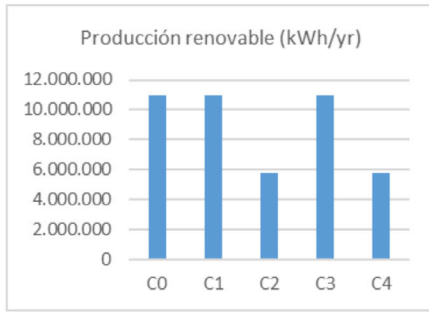
los costes energéticos. Se considera que la vida útil del proyecto es de diez años, plazo en el que se pretende cumplir el objetivo de hacer del puerto deportivo una zona sostenible. En el caso de LMDV, el análisis de sensibilidad se ha realizado con variaciones del 25% al alza y a la baja del consumo y del precio de la electricidad. La nomenclatura de la presentación de resultados contiene una letra correspondiente al escenario estratégico seguida de un número: 0 para los escenarios sin cambios, 1 o 2 para el aumento o la disminución del consumo, respectivamente, y 3 o 4 para el aumento o la disminución del precio de la electricidad.

## **RESULTADOS**

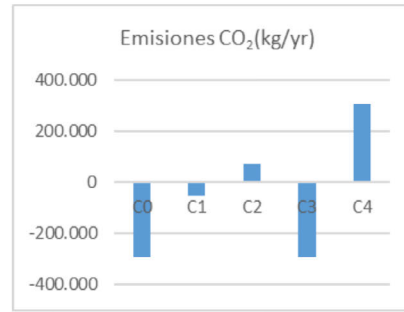
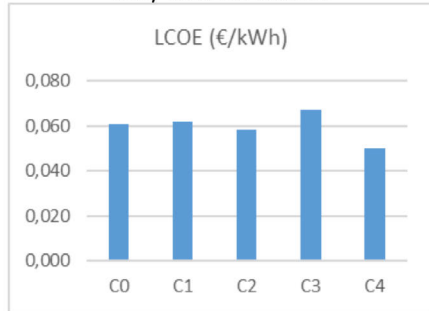
Una vez definido el escenario estratégico se realiza la primera simulación de la propuesta. A continuación se lleva a cabo un análisis de sensibilidad para estudiar la influencia de las variaciones en los parámetros seleccionados y decidir la priorización y planificación de las medidas que forman parte del escenarios estratégico propuesto.

La estrategia de mínimo coste incluye la instalación de 2.76 MW de paneles fotovoltaicos y un aerogenerador de 2 MW, además del cambio a tecnología LED en el alumbrado. El cambio de iluminación supone un coste total de 114762 euros y representa un ahorro del 7.9% de energía y 62.94 tCO<sub>2</sub> de emisiones al año. La amortización de esta medida de eficiencia es de 2.4 años.

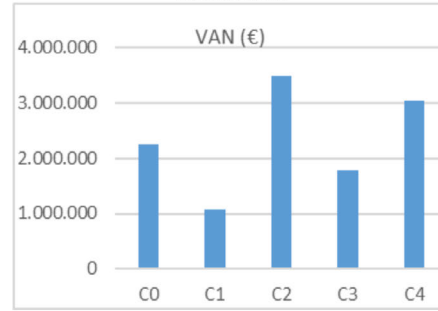
En el caso base (C0) se alcanza una producción de casi 11,000 MWh anuales, superior a consumo, y un LCOE de 6.1 cents €/kWh. La configuración óptima cambia con respecto a C0 cuando baja el consumo o el precio de la electricidad (C2 y C4), lo que provoca la supresión del aerogenerador. El LCOE mínimo se obtiene en C4. En cambio, la producción de energía en C4 es menor no cumpliéndose el principal objetivo del DEP de un balance anual positivo de energía. Además en C4 hay una reducción de emisiones respecto a las actuales (808.115 kg CO<sub>2</sub>/año), pero no hay un excedente de producción de energía que compense las emisiones de la red. Lo mismo ocurre en C2, pero en C2 se reduce el consumo. Por tanto, hay más ahorro de emisiones. En ninguna de las variaciones contempladas la configuración óptima incluye un sistema de almacenamiento.



a) Renewable energy production of min. cost variations.

b) CO<sub>2</sub> emissions of min. cost variations.

c) LCOE of min. cost variations.



d) NPV of min. cost variations.

| ESCENARIO  | Potencia instalada (MW) |      |       | Inversor (MW) | Capacidad baterías (kWh) | Inversión (€) |
|------------|-------------------------|------|-------|---------------|--------------------------|---------------|
|            | PV                      | Wind | Total |               |                          |               |
| C0, C1, C3 | 2.76                    | 2    | 4.76  | 2.48          | 0                        | 4,560,809     |
| C2, C4     | 2.76                    | 0    | 2.76  | 2.48          | 0                        | 1,946,809     |

Table 3. Configuración de escenarios.

## CONCLUSION

En este trabajo, presentamos una metodología para planificar y prever diferentes escenarios para lograr la DEP. El método considera la recopilación de datos, el análisis de la demanda, un estudio de la capacidad de energía renovable factible y la simulación tecno-económica de los diferentes escenarios. El método se valida en el FMU de la ciudad de València. Los FMU son distritos particularmente interesantes de las ciudades, ya que a diferencia de la mayoría de los distritos urbanos, tienen grandes espacios para la generación renovable. Los resultados muestran una trayectoria una combinación de medidas de eficiencia de la demanda (iluminación LED) y la instalación de energía solar fotovoltaica para la obtención de un DEP en un escenario estratégico de mínimo coste. Si bien la inclusión de un aerogenerador no resulta la más óptima en caso de que se produjera una disminución del consumo o de el precio de la electricidad. Reduciéndose el consumo podría prescindirse del aerogenerador

y las condiciones seguirían siendo las de un DEP, sin embargo si manteniendo el consumo no se incluye el generador la producción in situ quedaría por debajo del consumo en el balance anual.

Salvo el escenario de bajada del precio de la electricidad, la configuración óptima de los escenarios supone un balance positivo de energía que se vertería a la red y produciría ahorros de emisiones debidos a la misma y ahorros económicos para LMDV.

El análisis de sensibilidad muestra cómo los escenarios se ven afectados por la incertidumbre. La inclusión de otras medidas depende de la evolución de los parámetros susceptibles de cambiar con el tiempo, pero las medidas comunes son el punto de partida de la estrategia energética en el FMU.

## ACKNOWLEDGEMENT

Agradecemos al Consorci València 2007 y al personal de mantenimiento del LMDV por su ayuda y suministro de datos. Este trabajo ha sido financiado en parte por la administración PÚBLICA española con la subvención FPU2016/00962. Y por la Cátedra de Transición Energética Urbana (Las Naves-FVCiE-UPV).

## REFERENCES

- Academic Press, J., & Wohlgemuth, N.** (2021). Chapter 18 Renewable energy technologies: barriers and policy implications. En Renewable-Energy-Driven Future. Technologies, Modelling, Applications, Sustainability and Policies. (págs. 539-562). Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820539-6.00018-2>
- Acciario, M., Ghiara, H., & Cusano, M.** (2014). Energy management in seaports: A new role for port authorities. Energy Policy, 71, 4-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.013>
- Autoridad Portuaria de Valencia.** (2020). Boletín Ambiental 2020. Ecoport 59. Valencia: APV.
- Fuster Palop, E.** (2019). Desarrollo de un modelo en código R para la estimación en cubiertas del potencial solar fotovoltaico [...]. Obtenido de <https://catenerg.webs.upv.es/wp-content/uploads/2020/02/TFM-Fotovoltaica-Enrique-Fuster-CATENERG.pdf>

- Gravagnuolo, A., & Angrisano, M.** (2013). Assessment of Urban Attractiveness of Port Cities in Southern Italy—A Case Study of Torre Annunziata. *Sustainability*, 5(9), 3906–3925. MDPI AG.
- IEA.** (2016). *Energy Technology Perspectives 2016. Towards Sustainable Urban Energy Systems.*
- Kerzner, H.** (2001). 3. Principles of Strategic Planning. En *Strategic Planning for Project Management Using a Project Management Maturity Model*. (págs. 1540). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Port of Amsterdam.** (2017).
- The Sustainable Port.** The Port of Amsterdam's sustainability objectives and initiatives. Recuperado el marzo de 2020, de [https://globalmaritimehub.com/wp-content/uploads/attach\\_872.pdf](https://globalmaritimehub.com/wp-content/uploads/attach_872.pdf)
- Port of Rotterdam.** (2019). Incentive Scheme For Climate-Friendly Shipping. Amsterdam. Obtenido en marzo 2021 de <https://www.portofrotterdam.com>
- V&A waterfront Cape Town.** (2019). V&A waterfront Cape Town. Recuperado el abril de 2020, de <https://www.waterfront.co.za/the-va/sustainability/our-journey-to-sustainability/>



# DIAGNÓSTICO DE LA VENTILACIÓN DE UN LABORATORIO DOCENTE DE LA ETSIE DE LA UPV

**Antonio Manuel Romero Sedó<sup>1</sup>, Paloma Arrué Burillo<sup>2</sup>, Jordi Francesc Romero Miquel<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universitat Politècnica de València, España, [aromeros@csa.upv.es](mailto:aromeros@csa.upv.es)

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de València, España, [paarbu@csa.upv.es](mailto:paarbu@csa.upv.es)

<sup>3</sup>Universitat de València, España, [fmjromero@gmail.com](mailto:fmjromero@gmail.com)

## ABSTRACT

The study of the safety conditions in the ventilation against the transmission of SARS-Cov-2 in a teaching laboratory, starts from the fulfillment of the norms and recommendations, but requires the verification by means of computational calculation by fluid dynamics to guarantee the flow. of air, the number of renewals and the absence of vortex formation in order to determine the safe areas within the enclosure and to quantify the adequate real capacity.

**Keywords:** SARS-CoV-2, Natural ventilation, forced ventilation, degree of comfort, teaching.

## INTRODUCTION

Con motivo de la pandemia del Covid-19, se hizo necesario realizar el diagnóstico de la ventilación de la zona 1 del laboratorio de Instalaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación (ETSIE) de la UPV donde se imparte docencia analizando las condiciones de ventilación existentes. En el estudio se ha tenido en cuenta la legislación vigente y las recomendaciones de la UPV, organismos oficiales y normativa alemana en materia de ventilación y renovación del aire.

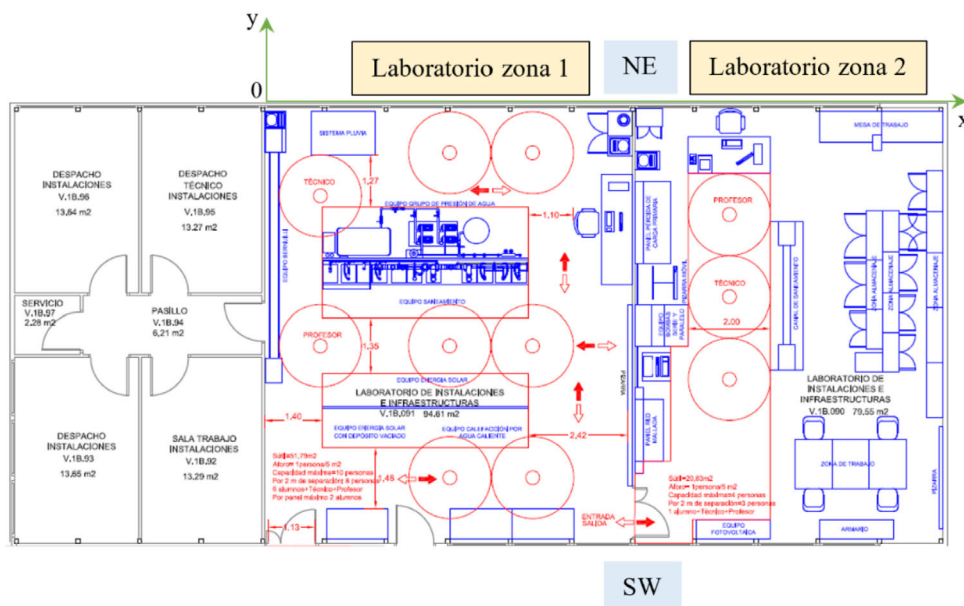
El estudio se ha basado en el cálculo computacional por dinámica de fluidos (CFD) en el que se recoge dos tipos de ventilación, natural y forzada. Con respecto a la ventilación natural ante la dificultad de predecir la diferencia de presión barométrica entre la entrada y la salida a través de las ventanas del laboratorio, se ha estimado un mínimo de 1 Pa. Con respecto a la ventilación forzada, se han seleccionado 3 casos después de haber optimizado todos los diseños posibles en función del espacio que dispone el laboratorio, por seguridad y economía.

Finalmente, de los resultados de las simulaciones computacionales se exponen los problemas encontrados en cada una de las ventilaciones a estudio, así como la solución más adecuada que se encuentra en el apartado de conclusiones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Laboratorio de instalaciones I, II e Infraestructuras de la ETSIE.

El laboratorio está formado por 4 zonas donde se imparte docencia siendo la zona 1 objeto del estudio, donde se realizan las prácticas de conducciones por gravedad, suministro de presión de agua potable a edificios, energía solar, calefacción por agua caliente y saneamiento. En la figura 1, se representan la zona 1, así como la ubicación de los equipos de laboratorio y ocupación máxima por el Covid-19.



**Figure 1.** Laboratorio zona 1 y 2 con la distribución de la sala de máquinas.

### Criterios de ventilación.

La legislación vigente estableció en el Acuerdo de 19 de junio, del Consell, sobre medidas de prevención frente al COVID-19, (DOGV, 2020), que la distribución de los asientos en las aulas permitiera garantizar la distancia mínima interpersonal de 1.50 metros y el aforo de las aulas no fuera superior a una persona por cada 2.5 m<sup>2</sup> de superficie. En el caso de los laboratorios docentes el aforo se limitará a 1 persona por cada 5 m<sup>2</sup>, con un máximo de 24 alumnos.

La recomendación del IDAE (IDAE,2020) respecto a la operación y mantenimiento de los sistemas de climatización y ventilación de edificios y locales para la prevención de la propagación del SARS-COV-2, estableció un caudal mínimo del aire exterior de 12.5 litros por segundo y ocupante, RITE IDA2, (BOE, 2006), (BOE, 2007).

El Ministerio de Universidades estableció, para una presencialidad adaptada en el curso 2020-2021, el coeficiente de ocupación teórico (COT) como la relación entre el número de estudiantes matriculados y la capacidad del local con una separación de 1.5 m entre ocupantes. Y el coeficiente de ocupación real (COR) con respecto a la capacidad real del local, (Ministerio de Universidades, 2020). Si COR es mayor que COT, la actividad no podría desarrollarse de forma presencial y si es menor, sí sería presencial garantizándose las medidas de distancia social e higiene vigentes.

El Plan de Prevención de la UPV en su Protocolo interno de actuación ante la alerta sanitaria por coronavirus Sar-COV-2 de 19 de mayo de 2020, (UPV, 2020), indicaba, por una parte en el apartado 6.2.3 “Ventilación natural y forzada de aspiración”, abrir cuando sea posible las ventanas durante un mínimo de 15 minutos al día y turno, o bien, actuar sobre la ventilación mecánica evitando la recirculación del aire e incrementando el volumen y ciclos de renovación de aire a las instalaciones de aire primario, del sistema de climatización de los edificios en que resulte técnicamente posible (en edificios con ventilación mecánica, la apertura de ventanas se puede utilizar para aumentar la ventilación global). Así como, incrementar la frecuencia de limpieza de filtros de aire y el nivel de humedad relativa del aire y mantener las puertas abiertas, siempre que sea posible. Por otra parte, en el apartado 6.3.2 “Limitación de aforo de los espacios” indica que se debe garantizar una separación de 2 m entre empleados públicos y 4 m<sup>2</sup> por persona. En laboratorios la distancia mínima de seguridad es de 2 m entre puestos. Por estas razones se determina un aforo de 8 personas en el laboratorio, 6 alumnos, un técnico y un profesor.

En cuanto al flujo de aire en la tabla 1 se indica la velocidad del aire relacionada con la sensación térmica utilizada en los proyectos de climatización de las zonas arquitectónicas con personas. (AENOR, 2019), (Carrier, 2009).

| VELOCIDAD DEL AIRE (M/S) | SENSACIÓN                                    |
|--------------------------|----------------------------------------------|
| < 0.8                    | Aire estancado (molestia)                    |
| 0.12                     | Ideal (favorable)                            |
| 0.25                     | Límite máximo para la actividad sedentaria   |
| 0.35                     | Provoca leve movimiento en elementos ligeros |
| 0.40                     | Límite máximo con actividad moderada         |
| 1.50                     | Límite máximo con actividad intensa          |

**Tabla 1.** Velocidades bajas del aire en correlación con la sensación térmica.

Las hipótesis de cálculo realizadas se indican en la tabla 2.

| HIPÓTESIS             | CARACTERÍSTICAS                                          |
|-----------------------|----------------------------------------------------------|
| Ventilación natural   | Ventanas NE y SW abiertas                                |
| Ventilación forzada 1 | Conducto central y un extractor en la cara SW.           |
| Ventilación forzada 2 | Sin conductos y tres extractores en la parte superior SW |
| Ventilación forzada 3 | Sin conductos y tres extractores en la parte central SW  |

Tabla 2. Hipótesis de cálculo.

RESULTADOS

Ventilación natural

El estudio pretende determinar la dirección y sentido de las líneas de corriente del aire, el rango de velocidades y el número de renovaciones del aire del recinto.

Se ha establecido que el recinto posee una presión barométrica mínima de 101325 Pa situada a 25º de la cara NE y de 101324 Pa 205ºSW, una temperatura ambiente de 22ºC y una humedad relativa del 50% (zona de confort), y una densidad del aire de 1.19 kg/m3. La base de datos de la estación meteorológica de Valencia-Aeropuerto de Manises, aunque no aplicable por razones de geografía, sí aporta información de una zona donde la velocidad del aire siempre es muy elevada y a pesar de ello para un periodo de 10 años la mayor diferencia de presión en un mismo día fue de 22.2 hPa.

En la simulación en CFD (Zienkiewicz & Taylor, 2000), (Systems, 2019) se han supuesto que las seis ventanas NE y las tres del SW se encuentran abiertas, siendo su tipología constructiva del tipo corredera y solo permiten abrirse la mitad de su sección. Por simplicidad no se ha considerado la pérdida de carga por las lamas, por ello los resultados de cálculo deben considerarse como valores mínimos. Los resultados se indican en las figuras 2 y 3.

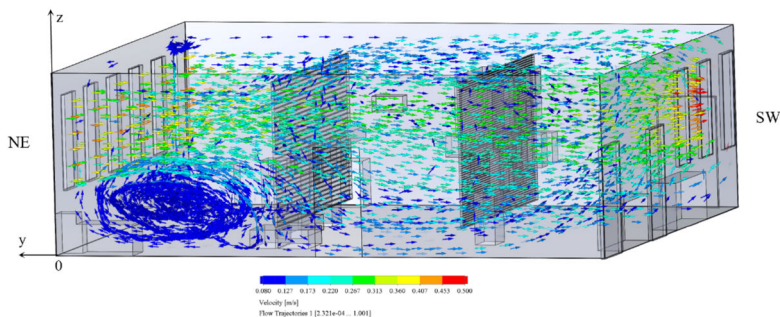
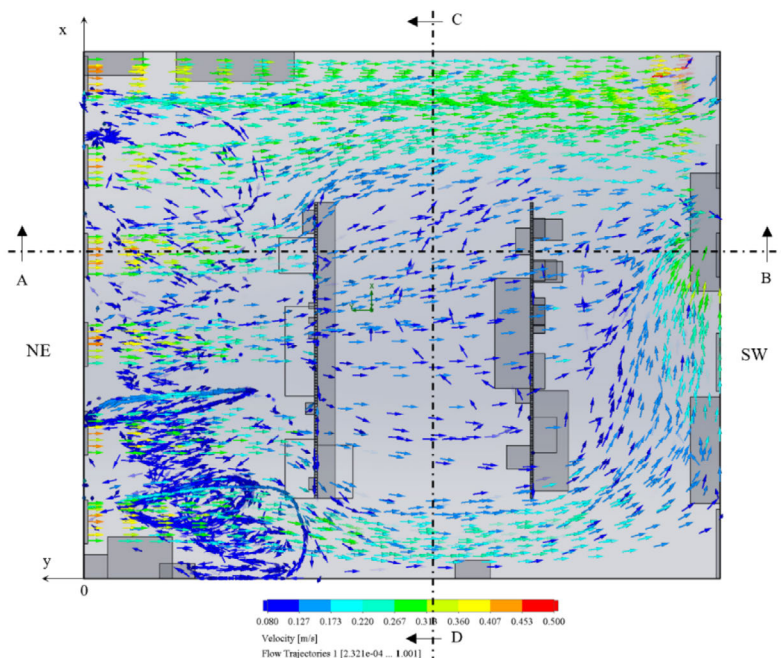


Figure 2. Ventilación natural. Líneas de corriente y velocidad del aire.

En la figura 2 se puede comprobar la existencia de un vórtice cercano a la cara NE y en la esquina Oeste (W) de dimensiones de 2 metros como mínimo de anchura y 3 metros de longitud, y con velocidades inferiores a 0.08m/s llegando a una velocidad mínima de  $2.32 \cdot 10^{-4}$  m/s. Por ello se aconseja no ocupar esta zona por ningún alumno, técnico de laboratorio o profesor. También, se observan líneas de corriente tanto por el suelo como por el techo con una velocidad inferior a 0.08 m/s.

En cambio, en las paredes de la cara Este (E) y Oeste (W) a la altura comprendida entre 1.20 y 2 metros las velocidades del aire se encuentran entre 0.22 y 0.36 m/s.

En la figura 3, se observa una escasa velocidad del aire existente en la zona central entre paneles técnicos y cerca de la pared SW, así como un estrangulamiento y variación de su dirección debido a la ubicación de los paneles. Existe una gran superficie donde la velocidad del aire se encuentra entre  $2.32 \cdot 10^{-4}$  y 0.13 m/s. En este espacio central existe la dificultad de ubicación de los alumnos debido a la falta de visibilidad para seguir los ensayos, por todo ello se recomienda por seguridad que ninguna persona se sitúe entre los dos paneles técnicos del laboratorio.



**Figure 3.** Ventilación natural. Planta de las líneas de corriente y velocidad del aire.

El caudal de aire es de  $3.63 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que determina un tiempo para una renovación del aire del laboratorio de 1.53 min, el número de renovaciones del aire en una hora es de 39.32, valor superior a la norma DIN 1946, que especifica que el número

de renovaciones en laboratorios debe de estar comprendido entre 8 y 15 renovaciones por hora. Dado que el aforo máximo es de ocho ocupantes el caudal de aire por persona es de 453.94 litros/s·persona, valor superior a 12.50 litros/s·persona recomendado en el IDA 2 del RITE. Como conclusión, aunque se cumple las condiciones de renovación de aire, el caudal por persona según RITE IDA 2 y, el Acuerdo de 19 de junio del Consell, sobre medidas de prevención frente al Covid-19 (DOGV número 8841 de fecha 20.06.2020), no es aconsejable por ventilación natural impartir docencia en el laboratorio de instalaciones debido a la formación de vórtices y estancamiento del aire entre los paneles técnicos, esto implica que el aforo establecido inicialmente de ocho ocupantes obtenido con la aplicación de la legislación se ve reducido drásticamente haciendo inviable impartir docencia en el laboratorio.

### Ventilación forzada

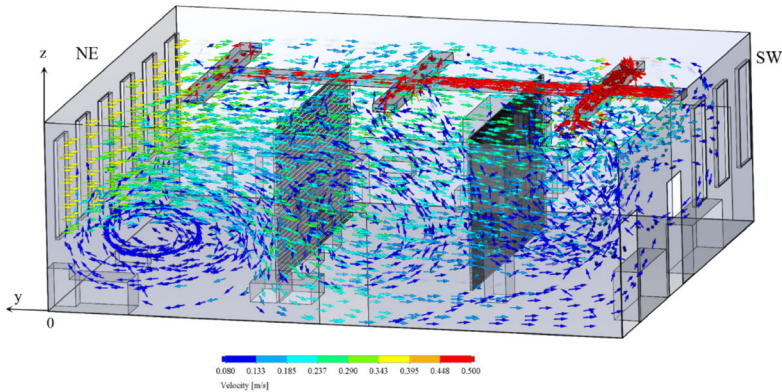
La ventilación forzada o mecánica se contempla como alternativa a la ventilación natural. Se han realizado 3 hipótesis de cálculo instalando sistemas de extracción mecánica de aire ubicados en la cara SW del laboratorio, considerando que la entrada del aire se realiza a través de las 6 ventanas de la cara NE con una presión atmosférica de 101325 Pa, manteniendo las 3 ventanas de la cara SW cerradas.

Las condiciones de contorno para el diseño se han basado por orden de preferencia en las siguientes objetivos: mantener las condiciones de confort con la humedad relativa próxima al 50% y 22°C; eliminar los vórtices en las líneas de corriente y zonas de remanso del aire; obtener un rango de velocidad entre 0.08 m/s y 0.5 m/s a los que va a estar sometido el personal del laboratorio; disminuir la velocidad máxima con la finalidad de minimizar el ruido producido por el aire, por razones de confort y de interferencias sonoras mientras el profesor imparte la clase; obtener entre 8 y 15 renovaciones por hora; lograr un caudal mínimo por ocupante de 12.50 litros/s·persona; y por último minimizar la potencia de los aparatos electromotores, con la finalidad de disminuir la huella de carbono, realizando varias simulaciones dinámicas, hasta optimizar la potencia eléctrica mínima necesaria.

### Ventilación forzada 1

Formada por conductos rectangulares de sección 400 x 150 mm x 150 mm con un aparato electromotor instalado en la cara SW. El diseño está basado en un único conducto como columna vertebral con 3 ramificaciones en T, en la zona de entrada de aire cara NE, en la zona central entre los paneles y en la zona de la cara SW. Cada una de las ramificaciones posee 2 rejillas totalmente abiertas, seis en total. El caudal

del extractor situado en la cara SW es de  $3.14 \text{ m}^3/\text{s}$ . En la figura 4, se representan las líneas de corriente mediante conductos.

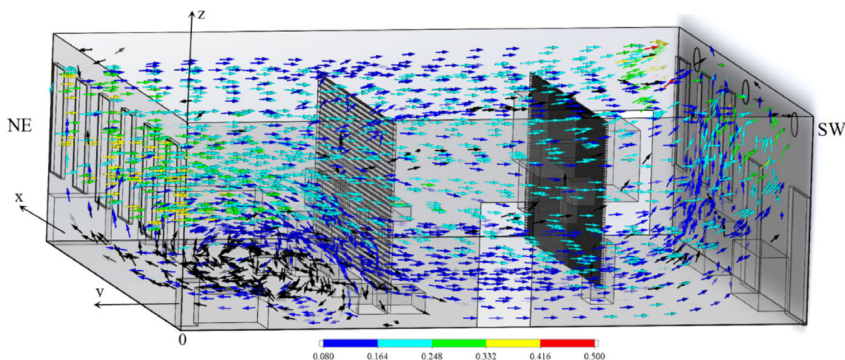


**Figure 4.** Ventilación forzada 1. Perspectiva, líneas de corriente y velocidad del aire.

En esta opción, se disminuye el volumen del vórtice de las caras NE- NW, en cambio se generan más vórtices, uno ubicado en la zona central entre paneles técnicos y otro entre el panel derecho y la cara SW. Además, la velocidad máxima de salida del aire  $58.07 \text{ m/s}$  es excesiva haciendo inviable esta opción.

### Ventilación forzada 2

Este diseño se basa en no disponer conductos con la finalidad de disminuir costes en la instalación. Ha consistido en instalar 3 extractores en la cara SW en la parte superior de las ventanas. El caudal de cada uno de los extractores ha sido de  $3.14 \text{ m}^3/\text{s}$ , siendo un total de caudal de  $9.42 \text{ m}^3/\text{s}$ . En la figura 5, se representan las líneas de corriente sin conductos.



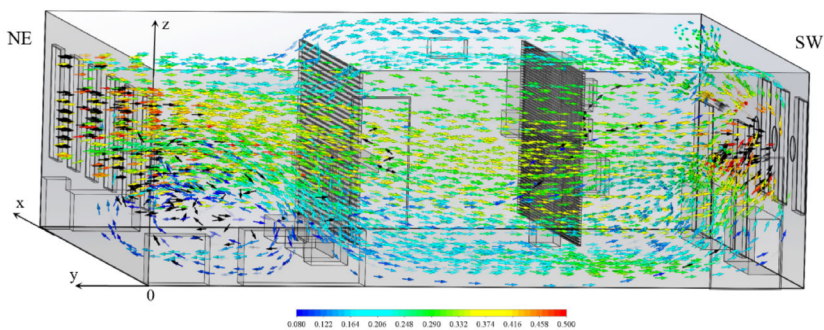
**Figure 5.** Ventilación forzada 2. Perspectiva, líneas de corriente y velocidad del aire.

Esta opción aun siendo más económica que la anterior, no elimina el vórtice entre las caras NE-NW. Se obtienen velocidades muy pequeñas en el suelo y en techo del orden de  $2.18 \cdot 10^{-6}$  a  $0.08$  m/s, siendo la velocidad máxima de  $3.34$  m/s ubicada en la salida de los extractores. Los resultados hacen inviable esta opción.

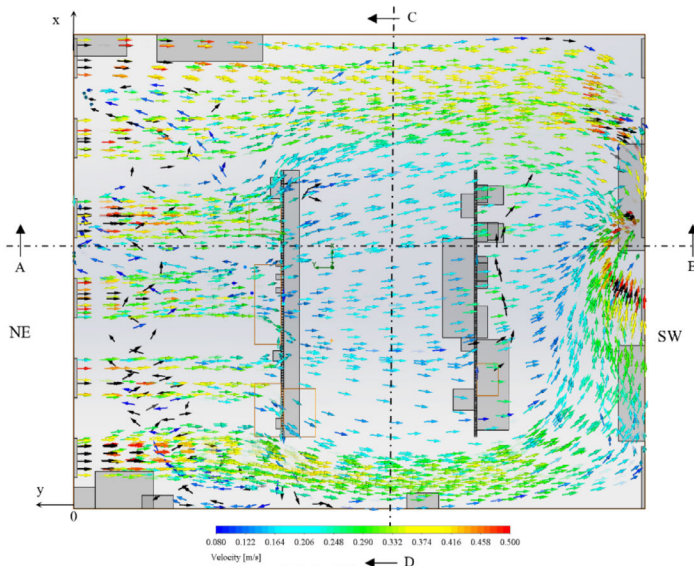
### Ventilación forzada 3

Este diseño basado en la ventilación forzada 2, ubicando los 3 extractores en el centro de las ventanas de la cara SW con un caudal unitario de  $1.70$  m<sup>3</sup>/s y un caudal total de  $5.10$  m<sup>3</sup>/s. De las hipótesis estudiadas, ésta es la más adecuada desde el punto de vista hidráulico y económico, desapareciendo prácticamente el vórtice de la cara NE-NW, y además no se generan nuevos vórtices en todo el volumen del laboratorio. En las figuras 6 y 7 se representan las líneas de corriente y velocidad.

Con la ventilación forzada se puede comprobar que las velocidades y caudal son mucho más elevadas y, por lo tanto, el caudal también será mayor. Lo más destacable de este supuesto es que los vórtices prácticamente desaparecen.



**Figure 6.** Ventilación forzada 3. Perspectiva, líneas de corriente y velocidad del aire.



**Figure 7.** Ventilación forzada 3. Planta, líneas de corriente y velocidad del aire.

En este supuesto las velocidades se encuentran entre  $1.18 \cdot 10^{-4}$  m/s y 5.20 m/s. La velocidad máxima es un 519.68 % mayor que en la velocidad natural para una diferencia de presión de 1 Pa. El caudal de aire es de 5.10 m<sup>3</sup>/s, con un tiempo para una renovación completa de 1.08 min y 55.45 renovaciones por hora. Para el aforo máximo de 8 ocupantes, el caudal de aire es de 637.5 litro/s.persona, superior a las recomendaciones del IDA 2 del RITE establecido en 12.50 litros/(s.persona).

Para obtener resultados similares con ventilación natural debería de existir una diferencia de presión dinámica mínima entre la cara NE y la SW de al menos 160 Pa. Estos valores, aunque teóricos, no se pueden obtener físicamente por la escasa distancia entre la cara NE y la SW.

La velocidad del aire obtenida prácticamente en todo el laboratorio por ventilación forzada es idónea para impartir clases docentes para un aforo de 8 personas, aunque sigue siendo preocupante la escasa velocidad en el volumen ocupado entre los dos paneles técnicos. En la tabla 3, se indica el resumen de resultados por cálculo dinámico computacional por elementos finitos (CFD) y las características de los extractores.

| Hipótesis       | Velocidad máx. salida (m/s) | Tiempo renovación (minutos) | Renovaciones por hora (n/hora) | Caudal por persona (litro/(s·pers)) | Observaciones del movimiento del aire |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Vent. Natural   | 1.28                        | 1.53                        | 39.48                          | 453.94                              | Vórtices (2x3m)                       |
| Vent. Forzada 1 | 58.07                       | 1.81                        | 33.19                          | 381.66                              | Velocidad elevada                     |
| Vent. Forzada 2 | 9.69                        | 1.76                        | 34.13                          | 392.43                              | Remansos                              |
| Vent. Forzada 3 | 16.14                       | 1.08                        | 55.44                          | 637.43                              | Dispersión uniforme                   |
| Extractores     | Nº                          | Caudal m³/s·ud              | Caudal total m³/s              | I (A)                               | Potencia total (W)                    |
| Vent. Forzada 1 | 1                           | 3.14                        | 3.14                           | 8.7                                 | 1700.85                               |
| Vent. Forzada 2 | 3                           | 3.14                        | 9.42                           | 8.7                                 | 5102.55                               |
| Vent. Forzada 3 | 3                           | 1.70                        | 5.10                           | 3.15                                | 1847.48                               |

**Tabla 3.** Resumen de cálculos de la ventilación natural y forzada

## CONCLUSION

Para poder afirmar que una ventilación es desde el punto de vista de la seguridad válida, no basta con cumplir la normativa oficial, es necesario realizar simulaciones mediante cálculo dinámico computacional para comprobar la dirección de las líneas de corriente, existencia de vórtices, remansos, velocidad del viento, caudales, NÚMERO de renovaciones del aire, eficiencia del sistema, etc.

La ventilación natural estudiada no es segura para poder impartir docencia por la formación de vórtices y bajas velocidades del aire. Sería necesario una diferencia presión natural mínima de 160 Pa para obtener valores que pudieran ser aceptables, y esto físicamente es imposible de obtener.

La ventilación forzada más adecuada es la ventilación forzada 3, aunque sigue siendo preocupante la escasa velocidad entre los paneles técnicos. Se recomienda instalar 3 extractores de 1.70 m³/s cada uno instalados en la parte central de las ventanas de la cara SW. Además, sería necesario que los motores electromecánicos estuvieran equipados por variadores de frecuencia, de esta forma se podría regular en función del aforo y de las condiciones de temperatura y humedad el caudal de los extractores.

Se recomienda que los extractores fuesen de corriente alterna trifásica, con la finalidad de disminuir la potencia consumida y en consecuencia la huella de carbono. Se debe tener muy en cuenta que el nivel sonoro de los extractores no genere interferencias sonoras mientras el profesor imparte la clase. Se recomienda instalar en el laboratorio, aparatos de medición y almacenamiento de datos de la temperatura,

humedad y concentración de CO<sub>2</sub>. Los aparatos deberán de estar conectados a un autómata de control programable PLC, y este a un ordenador y a los variadores de frecuencia a través de un bus de comunicación.

## REFERENCES

- AENOR** (2019). Eficiencia energética de los edificios. Ventilación para edificios, Parte 2: Interpretación de los requisitos de la Norma EN 16798-1. Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido (Módulo 1.06). UNE-CEN/TR 16798-2:2019. Madrid: AENOR.
- Carrier Air Conditioning Company.** (2009). Manual de aire acondicionado. Marcombo.
- España.** Acuerdo, de 19 de junio, sobre las medidas de prevención frente a la covid 19. Diario Oficial de la Generalitat Valenciana, 20 de junio de 2020, NÚM. 8841, pp. 24259-24277.
- España.** Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo y corrección de errores, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Aplicación de la exigencia HS 3 Calidad del aire interior. Boletín Oficial del Estado, 28 de marzo de 2006, NÚM. 74, pp. 11816-11831.
- España.** Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el reglamento de Instalaciones térmicas en los Edificios. Boletín Oficial del Estado, 29 de agosto de 2007, NÚM. 207, pp. 35931-35984.
- Gobierno de España.** (2020). Recomendaciones del Ministerio de Universidades a la comunidad universitaria para adaptar el curso universitario 2020-2021 a una presencialidad adaptada. Madrid: Gobierno de España, Ministerio de Universidades.
- Gobierno de España.** (2020). Recomendaciones de operación y mantenimiento de los sistemas de climatización y ventilación de edificios y locales para la prevención de la propagación del SARS-CoV-2. Madrid, España: Ministerio de Sanidad, Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía.

**Universitat Politècnica de València** (2020). Protocolo interno de actuación ante la actividad de la alerta sanitaria por coronavirus SAR-COV-2. [Internet]. Disponible en: <http://www.upv.es/entidades/VIIT/info/U0858618.pdf>, (19 de mayo de 2020).

**Systems, S. D.** (2019). SolidWorks Education Edition. <http://www.solidworks.es>.

**Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L.** (2000). The finite element method. Volume 3, Fluid dynamics (5th ed..). Oxford [etc.]: Butterworth-Heinemann.

# FEASIBILITY OF USING GREEN ROOF AND SHADING DEVICE BY ADOPTING THE TOTAL ENERGY CONSUMPTION APPROACH: A CASE STUDY IN TEHRAN

Francisco Javier Cárcel Carrasco<sup>1</sup>, Luis Manuel Palermo Iglesias<sup>2</sup>, Nima Amani<sup>3</sup>, Ali Rafat Gigasari<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universitat politècnica de valència, Spain, [fracarc1@csa.upv.es](mailto:fracarc1@csa.upv.es)

<sup>2</sup>Universitat politècnica de valència, Spain, [lpalmero@csa.upv.es](mailto:lpalmero@csa.upv.es)

<sup>3</sup>Islamic Azad University of Chalous, Iran, [nimaamani@iauc.ir](mailto:nimaamani@iauc.ir)

<sup>4</sup>Universitat politècnica de valència, Spain, [arafgig@doctor.upv.es](mailto:arafgig@doctor.upv.es)

## ABSTRACT

Greenhouse gases are responsible for climate change, and the building sector is one of the main areas to reduce carbon dioxide emissions. In terms of air pollution, Tehran is one of the top cities in the ranking (Heger and Sarraf 2018). Therefore, paying more attention to this issue is absolutely essential. GB (green building) is one of the parameters to achieve a sustainable city. This paper analyses GR (green roof) and SD (shading device), which are two crucial parts of a GB from the EC (energy consumption) approach in a residential building in Tehran city.

The heating and cooling system in the building is based on natural gas and electricity. This paper compares energy consumption, including ELC (electricity consumption) and GC (gas consumption) before and after GR and SD to find out whether or not they are suitable for this building and the current case study.

**Keywords:** Green building, Green roof, Shading devices, Electricity consumption, Gas consumption.

## INTRODUCTION

With the remarkable rise in EC and greenhouse gases due to increasing population and improvement of living standards, energy conservation has become a crucial subject in sustainable development (Li *et al.* 2021). The building sector consumes 40% of global energy and produces 30% of carbon dioxide emissions (Wu *et al.* 2019). Greenhouse gases are responsible for climate change (Mustaffa, Mat Isa, and Che Ibrahim 2021).

According to predictions carbon emissions of buildings will go up to 42.4 billion tons in 2035, 43% increase compared to 2007 (Kearney 2010). saving energy and following carbon emission reduction is a significant issue now and in the future. The concept of green building has been known as an innovative approach to carrying out and reaching sustainability (Abdelaal and Guo 2021). A GB is usually introduced as an environmentally friendly building with efficient energy, low environmental impact and high-recycled materials compared to a non-green building (Ali and Al Nsairat 2009). GB does not only reduce the negative impact on the environment but also decreases operating energy costs. Using fossil fuels for generating electricity indicates an unsustainable urban area (Martinopoulos 2020). Roofs generally cover 20-25% of the total urban area (Izquierdo, Rodrigues, and Fueyo 2008). A GR is a good step to reach a green building and following it, sustainability. In recent years GR approach has illustrated sustainability and has been spreading fast in many countries (Shafique, Kim, and Rafiq 2018). GR prevents short wave radiation absorption and works like thermal insulation in the roof, which means it prevents heat entering in summer and heat escaping in the winter (Gunawardena, Wells, and Kershaw 2017).

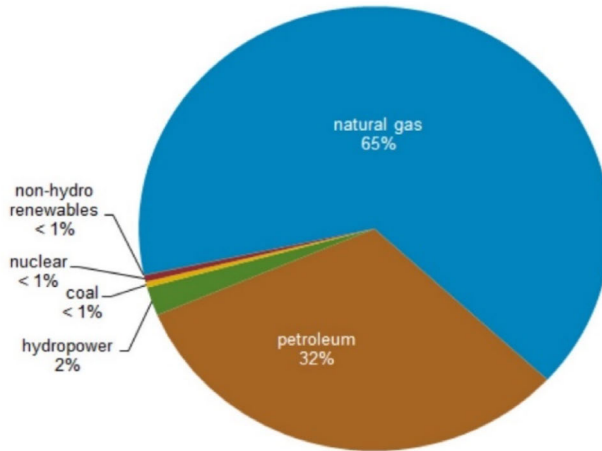
Furthermore, it can mitigate the urban heat island effect (Takebayashi and Moriyama 2007) (Ouldboukhite, Belarbi, and Sailor 2014), Reduce water runoff (Speak *et al.* 2013). Only 13% of the solar radiation can pass through the GR while 27% is reflected and 60% is absorbed by soil and plants (Ekaterini and Dimitris 1998). Another part of GB is the green façade and window shading is a segment of the green façade (Zheng, Dai, and Tang 2020). Shading devices (SD) are widely used in building to improve energy performance by controlling solar radiation and sunlight (Yao 2020). For instance, if the window is completely shaded by the shading device, it can block solar heat gain by approximately 80% (Chi *et al.* 2020). Using SD for the windows in the height of summer reduces the temperature by 4-6 degrees. (Ip *et al.*, 2004).

## METHODOLOGY

### Case study

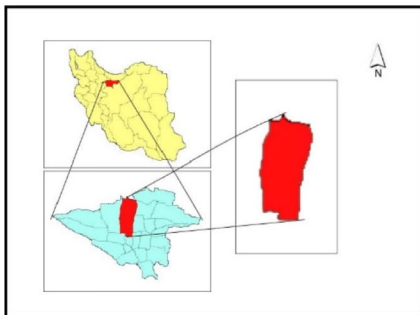
Iran is among the countries where generating electricity is based on fossil fuels. fossil fuels have a huge share of EC in Iran (Fig 1). Tehran as the capital and most populated city of Iran significantly affects climate change. Tehran is surrounded by mountains in the north and eastern spatial orientation that allows incoming wind from the west and due to these mountains polluted air gets trapped in the city. (Alijani *et al.* 2020). Therefore, Tehran is struggling to become a sustainable city, because the HVAC system is directly or indirectly dependant on non-renewable energy sources (Raoufi and

Gorji 2021). Generally, 20% of the total energy of Iran is consumed in Tehran(Naddafi *et al.* 2012). The people of Tehran experienced just one month per year with clean air in 2017(Tavana *et al.* 2019).

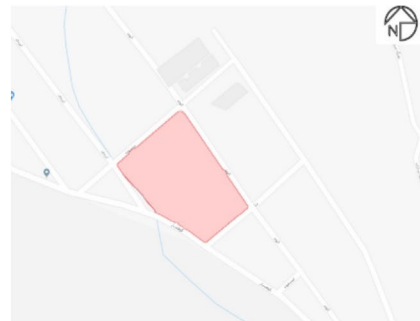


**Figure 1.** Share of EC sources in Iran by 2019 (Administration 2021)

Tehran has hot summers and cold winters and temperature typically varies from 1°C to 36 °C and rarely below -3°C or above 39°C (Anon n.d.). The current site plan is located in district 2 of Tehran(Fig 2). The shape of the site plan is west to the east making it easier to arrange space with convenient natural lighting. The site with a residential building(Fig 3) with 149 m<sup>2</sup> basement(Fig 4), 214 m<sup>2</sup> ground floor(Fig 5), 88 m<sup>2</sup> first-floor (Fig 6) and mound 14 m<sup>2</sup> (Fig 7) is considered for housing 8 people in this building and the orientation is southeast. The building uses gas for heating and electricity for cooling as well as electricity for domestic hot water. The HVAC system in this building is Package DX.



**Figure 2.** District 2 of Tehran



**Figure 3.** Site location



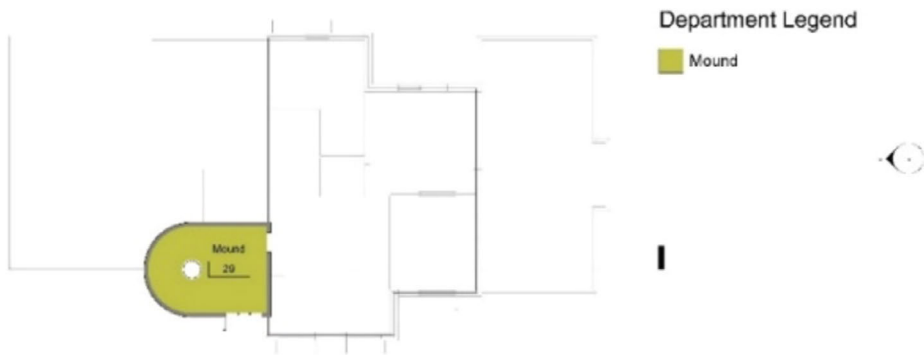
Figure 4. Basement plan



Figure 5. Ground floor plan



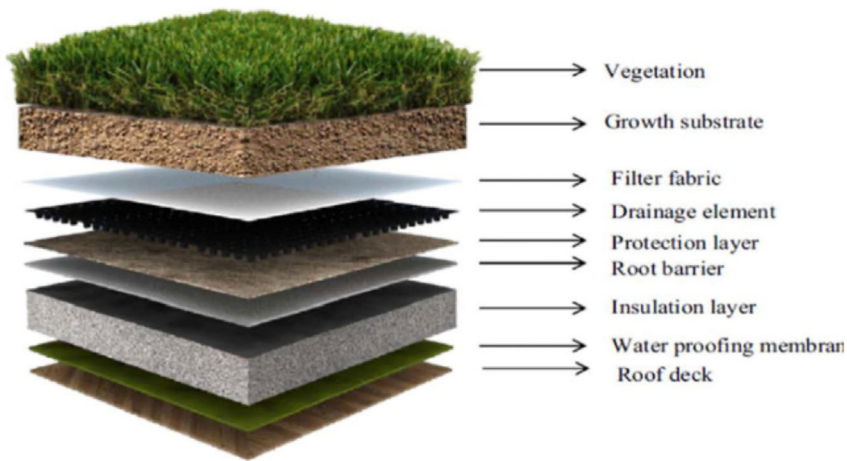
**Figure 6.** First-floor plan



**Figure 7.** Mound plan

### Simulation and research methods Green roof

A GR usually is comprised of several components like (Fig 8) vegetation, substrate, filter layer, drainage material, insulation, root barrier, and waterproofing membranes (Department of Planning 2010). The optimal selection of each component of the GR is very important to achieve the best result, each part separately plays a very important role in improving the efficiency of the GR (Vijayaraghavan and Joshi 2015). Reducing thermal discomfort during summer (Roeland *et al.* 2019) and absorbing urban environmental sounds (Solcerova *et al.* 2017) are some of the roles these layers play.



**Figure 8.** Layers of GR(Le Trung *et al.* 2018)

### Some type of shading device

The target of SD is to magnify the shading ratio in the building openings to prevent overheating during summer and finally lowering energy demands for interior spaces. (Valladares-rendón, Schmid, and Lo 2017). Fixed SD can be installed inside or outside the window; External SD has higher performance compared to internal one(Atzeri, Cappelletti, and Gasparella 2014). The other type of SD is overhang, which is installed horizontally upon the windows, their height, type, shape and depth could be different depending on the conditions. Another kind of SD is Egg-Crate that due to their slats (vertical and horizontal) can block the sunlight from all directions. Horizontal louvers, Vertical louvers which is effective for use in east and west facade. Venetian Blinds mostly are used for commercial buildings and Movable SD that in the summer blocks sunlight and in the winter allows penetrating sunlight into the spaces in the building(Kirimtat *et al.* 2016) In the current building, all the building openings (doors and windows) have fixed shading devices.

### Design builder as energy simulation software

Design builder (version 7.0.0.082) provides dynamic and energy simulation for buildings. The precision of this software package is validated using the Building Energy Simulation TEST method adopted by the United States Department of Energy (US-DOE) and the international community(Khalid *et al.* 2019). The simulation is based on real hourly weather data, the period of simulation is a year (January 1st to December 31st). At first, the simulation didn't utilize GR and SD and calculated EC and

in the next step simulation was carried out adding GR and then SD, each of them separately.

The goal of this research is to find the amount of energy saved when using the GR and shading device separately for Tehran and similar climate zone for a residential building and compare software output with and without any of the parameters.

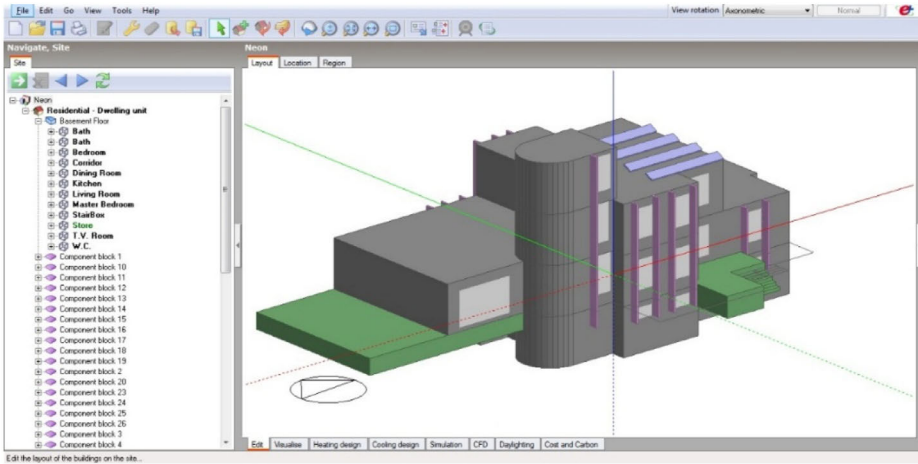


Figure 9. Building modelling in design builder software

## RESULTS AND DISCUSSION

According to the simulation results (Fig 9), total EC including total electricity and gas consumption during a year is 15837 kwh, which is 15021 kwh for the electricity consumption (ELC) which consists of lighting, electrical devices, domestic hot water and cooling and 816 kwh for the GC.

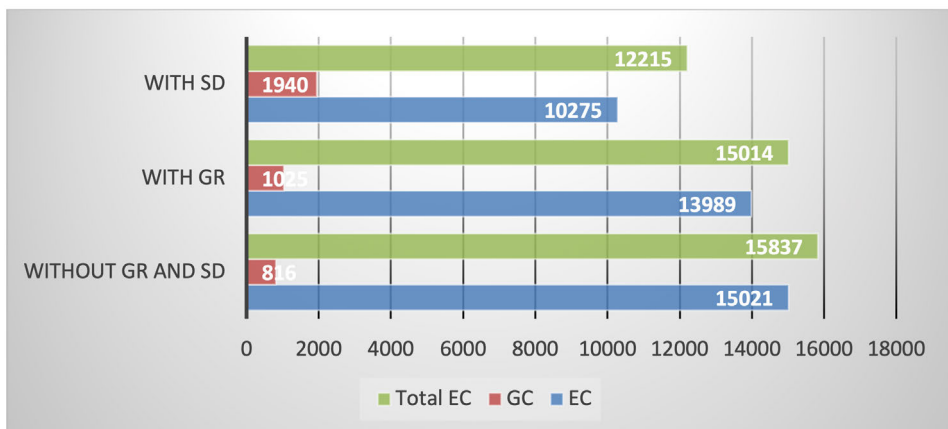


Figure 10. EC with and without GR and SD (KWh)

However, after using the GR, ELC goes down to 13989 kwh, a 7% decrease in electricity consumption and GC goes up to 1025 kwh, a 10% increase. Moreover, the total EC is 15014 kwh, just 5% saving in total EC which is not a significant reduction overall. The results show the GR acts as thermal insulation in the summer, because just 13% of the solar radiation can pass through the GR(Ekaterini and Dimitris 1998), otherwise, due to the same reason, it can increase the GC in the winter for heating.

The ELC after utilization of shading devices is 10275 kwh, and GC 1940 kwh, a 32% decline and a 58% enhancement respectively, whilst total EC of 12215 kwh means 13% energy saving. The outcome proves a shading device blocking sunlight could be very effective and make a significant decrease the amount of electricity being used, although in the wintertime, it undoubtedly has a meaningful increase in the GS.

## CONCLUSION

The result of the analysis shows that in terms of both GR and SD, inference about the efficiency of any of them depends on many parameters, like HVAC system, type of climate zone, etc. For instance, in this building, if the heating system was based on electricity, the EC could be different. According to the result, there was not a remarkable difference in EC in the building with and without GR due to increasing in GC. The creation of a GR is more effective and affordable if we use it in a climate zone with prolonged sunshine duration per day and moderate winters.

As seen in the results, GR has well performance in the summertime and reduces ELC for cooling, but in the winter it will increase GC for heating. In addition, the function of GR in reducing cooling load is proportional to substrate's insulation performance and reflection and absorption of solar radiation by vegetation layer (Feyisa, Dons, and Meilby 2014) (Abuseif, Dupre, and Michael 2021).

In the case of SD, there was a considerable decrement in ELC in the winter due to sunlight blockage and a twofold increase in GC for the same reason. The main reason for this problem is using fixed SD in the building, utilization of a moveable SD on daily, monthly or seasonal terms allows it to be more efficient compared to a fixed one (Akbari Paydar 2020).

## REFERENCES

**Abdelaal, Fatma, and Brian H. W. Guo.** 2021. "Knowledge, Attitude and Practice of Green Building Design and Assessment: New Zealand Case." *Building and Environment* 201(February):107960. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107960.

- Abuseif, Majed, Karine Dupre, and Ruby Michael.** 2021. "The Effect of Green Roof Configurations Including Trees in a Subtropical Climate: A Co-Simulation Parametric Study." *Journal of Cleaner Production* 317(June):128458. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128458.
- Administration, U. S. Energy Information.** 2021. "Country Analysis Executive Summary : Iran."
- Akbari Paydar, Meysam.** 2020. "Optimum Design of Building Integrated PV Module as a Movable Shading Device." *Sustainable Cities and Society* 62(July):102368. doi: 10.1016/j.scs.2020.102368.
- Ali, Hikmat H., and Saba F. Al Nsairat.** 2009. "Developing a Green Building Assessment Tool for Developing Countries Case of Jordan." *Building and Environment* 44(5):1053–64. doi: 10.1016/j.buildenv.2008.07.015.
- Alijani, Saeideh, Ahmad Pourahmad, Hossein Hatami Nejad, Keramatollah Ziari, and Sahar Sodoudi.** 2020. "A New Approach of Urban Livability in Tehran: Thermal Comfort as a Primitive Indicator. Case Study, District 22." *Urban Climate* 33(June):100656. doi: 10.1016/j.uclim.2020.100656.
- Anon.** n.d. "No Title." <https://weatherspark.com/y/105125/Average-WeatherAtzeri,AnnaMaria,FrancescaCappelletti,andAndreaGasparella.2014.> "Assessment Of Long-Term Visual And Thermal Comfort And Energy Performance In OpenSpace Offices With Different Shading Devices."
- Chi, Fang'ai, Ruonan Wang, Gaomei Li, Liming Xu, Yonghe Wang, and Changhai Peng.** 2020. "Integration of Sun-Tracking Shading Panels into Window System towards Maximum Energy Saving and Non-Glare Daylighting." *Applied Energy* 260(November 2019):114304. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114304.
- Department of Planning, Lg.** 2010. Chapter 6 Rain Gardens, Green Roofs and Infiltration Systems.
- Ekaterini, Eumorfopoulou, and Aravantinos Dimitris.** 1998. "The Contribution of a Planted Roof to the Thermal Protection of Buildings in Greece." *Energy and Buildings* 27(1):29–36.
- Feyisa, Gudina Legese, Klaus Dons, and Henrik Meilby.** 2014. "Efficiency of Parks in Mitigating Urban Heat Island Effect: An Example from Addis Ababa." *Landscape and Urban Planning* 123:87–95. doi: 10.1016/j.landurbplan.2013.12.008.

- Gunawardena, K. R., M. J. Wells, and T. Kershaw.** 2017. "Utilising Green and Bluespace to Mitigate Urban Heat Island Intensity." *Science of the Total Environment* 584–585:1040–55. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.158.
- Izquierdo, Salvador, Marcos Rodrigues, and Norberto Fueyo.** 2008. "A Method for Estimating the Geographical Distribution of the Available Roof Surface Area for Large-Scale Photovoltaic Energy-Potential Evaluations." *Solar Energy* 82(10):929–39. doi: 10.1016/j.solener.2008.03.007.
- Kearney, Diane.** 2010. "EIA's Outlook Through 2035 From the Annual Energy Outlook 2010." Stb.Gov.
- Khalid, Waleed, Muhammad Abdul, Ali Mohammed, and M. Algarny.** 2019. "Impact of External Shading Strategy on Energy Performance of MultiStory Hotel Building in Hot-Humid Climate." *Energy* 169:1166–74. doi: 10.1016/j.energy.2018.12.069.
- Kirimtat, Ayca, Basak Kundakci, Ioannis Chatzikonstantinou, and Sevil Sariyildiz.** 2016. "Review of Simulation Modeling for Shading Devices in Buildings." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53:23–49. doi: 10.1016/j.rser.2015.08.020.
- Li, Qing, Lianying Zhang, Limao Zhang, and Sunil Jha.** 2021. "Exploring Multi-Level Motivations towards Green Design Practices: A System Dynamics Approach." *Sustainable Cities and Society* 64(September 2020):102490. doi: 10.1016/j.scs.2020.102490.
- Martinopoulos, Georgios.** 2020. "Are Rooftop Photovoltaic Systems a Sustainable Solution for Europe? A Life Cycle Impact Assessment and Cost Analysis." *Applied Energy* 257(August 2019):114035. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114035.
- Mustaffa, Nur Kamaliah, Che Maznah Mat Isa, and Che Khairil Izam Che Ibrahim.** 2021. "Top-downBottom-upStrategicGreenBuildingDevelopmentFramework: Case Studies in Malaysia." *Building and Environment* 203(June):108052. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108052.
- Naddafi, Kazem, Mohammad Sadegh Hassanvand, Masud Yunesian, Fatemeh Momeniha, Ramin Nabizadeh, Sasan Faridi, and Akbar Gholampour.** 2012. "Health Impact Assessment of Air Pollution in Megacity of Tehran, Iran." *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 9(1):1–7.

- Ouldboukhittine, Salah Eddine, Rafik Belarbi, and David J. Sailor.** 2014. "Experimental and Numerical Investigation of Urban Street Canyons to Evaluate the Impact of Green Roof inside and Outside Buildings." *Applied Energy* 114:273–82. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.09.073.
- Raoufi, Azadeh, and Mazdak Gorji.** 2021. "Water and Energy Management in a Sustainable Site: A Case Study of a Living Environment for Street Children in Tehran, Iran." *Sustainable Cities and Society* 68(20):102797. doi: 10.1016/j.scs.2021.102797.
- Roeland, Samson, Marco Moretti, Jorge Humberto Amorim, Cristina Branquinho, Silvano Fares, Federico Morelli, Ülo Niinemets, Elena Paoletti, Pedro Pinho, Gregorio Sgrigna, Vladimir Stojanovski, Abhishek Tiwary, Pierre Sicard, and Carlo Calfapietra.** 2019. "Towards an Integrative Approach to Evaluate the Environmental Ecosystem Services Provided by Urban Forest." *Journal of Forestry Research* 30(6):1981–96. doi: 10.1007/s11676-019-00916-x.
- Shafique, Muhammad, Reeho Kim, and Muhammad Rafiq.** 2018. "Green Roof Benefits, Opportunities and Challenges—A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90(April 2017):757–73. doi: 10.1016/j.rser.2018.04.006.
- Solcerova, Anna, Frans van de Ven, Mengyu Wang, Michiel Rijdsijk, and Nick van de Giesen.** 2017. "Do Green Roofs Cool the Air?" *Building and Environment* 111:249–55. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.10.021.
- Speak, A. F., J. J. Rothwell, S. J. Lindley, and C. L. Smith.** 2013. "Rainwater Runoff Retention on an Aged Intensive Green Roof." *Science of the Total Environment* 461–462:28–38. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.04.085.
- Takebayashi, Hideki, and Masakazu Moriyama.** 2007. "Surface Heat Budget on Green Roof and High Reflection Roof for Mitigation of Urban Heat Island." *Building and Environment* 42(8):2971–79. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.06.017.
- Tavana, Alireza, Alireza Emami Javid, Ehsan Houshfar, Amin Mahmoudzadeh Andwari, Mehdi Ashjaee, Saeed Shoaee, Abtin Maghmoomi, and Fatima Marashi.** 2019. "Toward Renewable and Sustainable Energies Perspective in Iran." *Renewable Energy* 139:1194–1216. doi: 10.1016/j.renene.2019.03.022.

- Le Trung, Nguyen, Mahnoor Khawaja, Elahe Beyranvand, Daniela Bucchi, Akashdeep Singh, and Abdul Ahad Alam.** 2018. "Approaching a Nearly Zero-Energy Building in Integrated Building Design by Using Green Roof and Double Skin Façade as Major Energy Saving Strategies." (November):1–12. doi: 10.13140/RG.2.2.10839.32163.
- Valladares-rendón, L. G., Gerd Schmid, and Shang-lien Lo.** 2017. "Review on Energy Savings by Solar Control Techniques and Optimal , Ade Shading Building Orientation for the Strategic Placement of Fac Systems." *Energy & Buildings* 140(71):458–79. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.073.
- Vijayaraghavan, K., and U. M. Joshi.** 2015. "Application of Seaweed as Substrate Additive in Green Roofs: Enhancement of Water Retention and Sorption Capacity." *Landscape and Urban Planning* 143:25–32. doi: 10.1016/j.landurbplan.2015.06.006.
- Wu, Zezhou, Heng Li, Yong Feng, Xiaochun Luo, and Qiaohui Chen.** 2019. "Developing a Green Building Evaluation Standard for Interior Decoration: A Case Study of China." *Building and Environment* 152(November 2018):50–58. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.02.010.
- Yao, Jian.** 2020. "The Uncertainty of Manual Shade Control on West-Facing Facades and Its Influence on Energy Performance." *Applied Thermal Engineering* 165(March 2019):114611. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114611.
- Zheng, Xing, Tianchen Dai, and Mingfang Tang.** 2020. "An Experimental Study of Vertical Greenery Systems for Window Shading for Energy Saving in Summer." *Journal of Cleaner Production* 259:120708. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120708.

# COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO EN LAS UNIONES SOLDADAS, ANÁLISIS DEL MÉTODO DE DESGASTE COMO MEDIDA DE MEJORA A LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL.

**Jorge Martínez Alcón<sup>1</sup>, Manuel Pascual Guillamón<sup>1</sup>, Lorenzo Solano García<sup>2</sup>, Francisco Javier Cárcel Carrasco<sup>1</sup>, Fidel Salas Vicente<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Instituto de Tecnología Materiales, Universitat Politècnica de València,  
46022 Valencia, España*

*<sup>2</sup>Instituto de Diseño y Fabricación, Universitat Politècnica de València,  
46022 Valencia, España*

## ABSTRACT

The study describes the process of analyzing the tribological behavior of welded joints, present in metallic structures and other structural elements affected by friction and wear, used in construction processes. Its control is of vital importance in ways to comply with the regulations regarding the structural code and on actions in the building that comply with the bearing capacity of the buildings. In the first part of the document, the concepts related to the science of tribology are briefly exposed. The elements that make up a tribological testing machine based on the “pin on disk” principle are described below.

Finally, a practical case is presented as an example and experimental validation of the friction and wear analysis on the welded joint of cast metal sheets welded with a 60% Ni-Fe contribution electrode, finally the conclusions and the derived advantages are exposed from the application of the method to the control and execution of welded joints on site.

**Keywords:** Tribometer, welded joint, friction, wear, structural control, building construction.

## INTRODUCTION

El estudio del comportamiento tribológico de las uniones soldadas presentes en las estructuras metálicas y demás elementos afectados por el rozamiento y desgaste usados en los procesos constructivos, puede contribuir en gran medida a la mejora del control preventivo frente a las acciones en la edificación, ya sean permanentes, variables o accidentales y que afectan a la estructura una vez construida. De igual modo, puede ser un parámetro indicador del cumplimiento de la normativa referida

al código estructural y sobre acciones en la edificación, que garantizan la capacidad portante de las estructuras que forman parte de los edificios.

La confiabilidad de las estructuras metálicas usadas en el ámbito de la edificación está regulada normativamente a través del “Código Técnico de la Edificación”, en concreto en su documento básico “DB SEA-Seguridad Estructural” publicado en el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. (BOE 28/3/2006). Referidos al apartado de seguridad control y ensayos, se encuentran los epígrafes dedicados al control de calidad, control de calidad de los materiales y control de calidad de la fabricación (Ministerio de Fomento, 2019, ).(EAE, 2011)

El “Código Estructural”, recientemente aprobado, (BOE 2019, 2021) tiene por finalidad mejorar la seguridad estructural y la seguridad en caso de incendio, así como la protección medioambiental y la utilización eficiente de los recursos naturales. Proporciona herramientas para la evaluación de la sostenibilidad de las estructuras considerando las características prestacionales, ambientales, sociales y económicas que aportan los agentes que participan en su proyecto y ejecución.

En el Código Estructural también se regulan las cuestiones relativas a bases de proyecto y análisis estructural, así como a los requisitos técnicos exigibles a los materiales o componentes, a la durabilidad y vida ÚTIL de las estructuras.

Dentro de los requisitos técnicos, parámetros como la durabilidad o vida ÚTIL pueden ser determinados a través de estudios de desgaste como el que aquí se presenta.

## **Tribología**

La tribología (del griego *tribō*, "frotar o rozar") (Santa-Marín & Toro-Betancur, 2015) (Castillo Herrera & Toapanta Cunalata, 2019)(Granizo, 2015) es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación; que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento (F. Díaz, 2007). Hoy en día la tribología está presente en multitud de componentes estructurales y en general en todos aquellos elementos o piezas mecánicas sometidas a movimientos que generen fricción o desgaste.

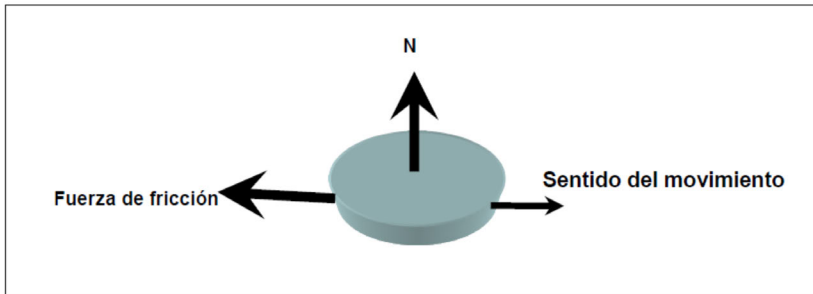
Así pues, los conceptos más importantes presentes en la tribología los constituyen: fricción, desgaste y lubricación que se describen a continuación.

## Fricción

Se denomina así a la fuerza que se opone al movimiento que tiene una superficie con otra (Figura 1). Este fenómeno ocurre cuando hay dos superficies en contacto y pueden existir dos tipos de fricción.

Fricción estática: Es el rozamiento que existe cuando dos cuerpos están en reposo.

Fricción Cinética: Es el rozamiento que existe con dos cuerpos en movimiento.



**Figura 1.** Esquema de la fuerza de fricción.

Si la fuerza de rozamiento o fuerza de fricción  $F_r$  es proporcional a la normal  $N$ , y a la constante de proporcionalidad se la llama  $\mu$ . La fuerza de fricción se define como:

$$F_r = \mu \times N \quad (1)$$

Donde  $F_r$  es la fuerza necesaria para iniciar y mantener el movimiento,  $N$  es la fuerza normal que mantiene las dos superficies juntas, y  $\mu$  se refiere al coeficiente de fricción, este se presenta entre metal-metal, metal-sólido o metal-fluido.

**Coeficiente de fricción ( $\mu$ ):** Este parámetro no es una propiedad intrínseca del material o de la combinación de varios, sino que depende de otros factores, como la humedad, temperatura, velocidad de desplazamiento, presión de contacto, tipo de lubricante, acabado superficial y forma de la región de contacto.

La relación entre la fuerza necesaria para iniciar el movimiento y el peso del elemento que se va a mover se conoce como coeficiente estático de fricción y la relación entre la fuerza necesaria para mantenerlo en movimiento y su peso se denomina coeficiente cinético de fricción, por deslizamiento o por rodadura.

## **Desgaste:**

Se puede definir como el efecto que causa la fricción y que provoca una pérdida de material de las superficies en contacto, concretamente la pérdida tiene lugar en el material de menor dureza.

En función de los materiales que están en contacto ya sean metálicos o no, existen varios tipos de desgaste, concretamente los siguientes:

- Desgaste por adherencia: Se produce cuando existe deslizamiento entre dos superficies bajo presión.
- Desgaste por abrasión: Se produce al desprenderse partículas duras que desgastan la superficie de contacto.
- Desgaste por ludimiento: Se produce debido al movimiento oscilatorio entre dos superficies.
- Desgaste por fatiga: Se produce debido a la fatiga superficial entre los materiales, sobre todo al ser un movimiento bidireccional. Suele ser el desgaste más común de todos.
- Desgaste por erosión: Se produce cuando se desprende material debido a un líquido que contiene partículas abrasivas.
- Desgaste corrosivo: Se produce al haber reacciones químicas o electrolíticas con el medio ambiente que aceleran la velocidad de desgaste.

## **Lubricación**

Este tipo de método tiene como finalidad evitar el contacto entre las superficies y así evitar que estas sufran daños o al menos, que este sea el menor posible. También, evitar el calentamiento de los materiales y disminuir la fricción entre ambas superficies.

Se pueden distinguir varios tipos de lubricación:

- Lubricación hidrodinámica: Este tipo proporciona una separación entre las superficies aportándoles estabilidad. Se realiza mediante movimiento relativo.
- Lubricación límite: Esta lubricación crea una película muy fina, que produce un contacto mínimo.

- Lubricación hidrostática: Se obtiene cuando se introduce el lubricante a presión en una zona de carga para crear una película protectora, no es necesario el movimiento relativo.

Además de los tipos de lubricación, se pueden distinguir diferentes lubricantes según las características que requiera la aplicación o dependiendo de los resultados que se desee obtener. Se pueden clasificar según las propiedades en:

- Lubricantes líquidos.
- Lubricantes gaseosos.
- Lubricantes sólidos.
- Lubricantes semisólidos o grasas.

### **Medida de parámetros mediante tribómetro**

El control del desgaste y fricción en piezas móviles pertenecientes a elementos estructurales o máquinas es una cuestión crítica a la que se ha de enfrentar la industria. Sería importante, en su control, incorporar datos procedentes de análisis obtenidos durante años para distintas condiciones de humedad, temperatura y/o en presencia de lubricantes; de los materiales que se emplean (Forn-Alonso *et al.*, 2005) (Camba *et al.*, 2010).

En este contexto, los tribómetros, y en específico los tipo “pin on disk”, tienen una amplia importancia en la investigación y simulación de procesos de desgaste bajo condiciones de fricción seca, sin lubricante, o en condiciones de fricción límite con una capa de lubricante líquido. De esta manera se pueden ejecutar ensayos tanto para materiales como para lubricantes.

De acuerdo con la norma principal para ensayos ASTM G99 (ASTM International, 2017), una probeta, estacionaria (pin o bola) ejerce una fuerza normal conocida que presiona a esta contra la superficie de la otra probeta a ensayar ubicada en el disco rotatorio.

La fuerza normal se aplica al pin o a la bola por medio de una serie de pesos muertos. Operando de esta manera, mediante los pesos muertos conseguimos una fuerza estable durante todo el ensayo.

El coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ) se obtiene durante el ensayo mediante la fuerza de rozamiento obtenida a partir de la deflexión del brazo elástico.

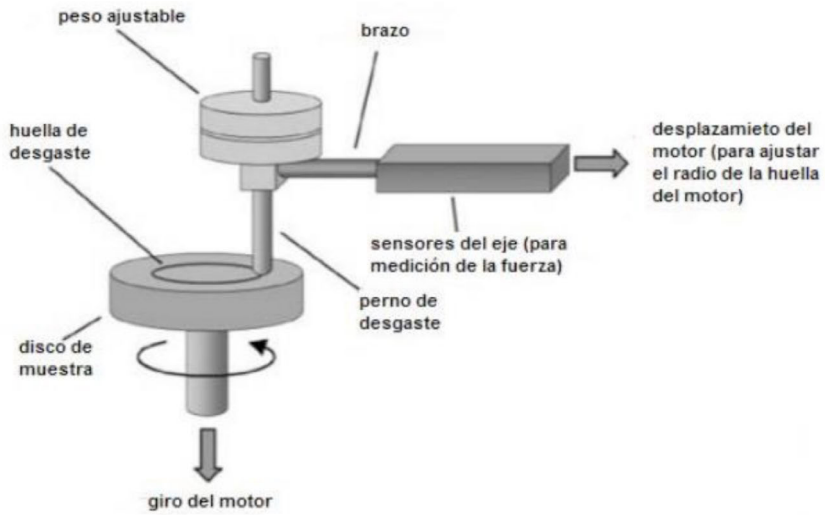
Así pues mediante estos equipos podemos evaluar y determinar el comportamiento tribológico (fricción y desgaste) entre dos materiales. Los parámetros evaluables de estos equipos para realizar pruebas, permiten crear las condiciones de simulación necesarias para analizar el comportamiento del desgaste con las distintas condiciones de ensayo (carga, distancia, velocidad, ambiente y tiempo) (Cárcel *et al*, 2017).

La norma ASTM establece a través de G99 la forma estándar para la medición y evaluación del desgaste entre dos materiales (ASTM International, 2017), en donde se indica que para el ensayo de desgaste se requieren dos cuerpos de ensayo (pin y un disco) que se encuentran en movimiento relativo (Figura 2), provocando una trayectoria de deslizamiento de forma circular sobre el disco. La primera probeta es un pin con punta redonda o plana, el cual soporta carga axial y que debe posicionarse de forma perpendicular sobre la segunda muestra, la cual es un disco circular plano que puede ser orientado horizontal o verticalmente.

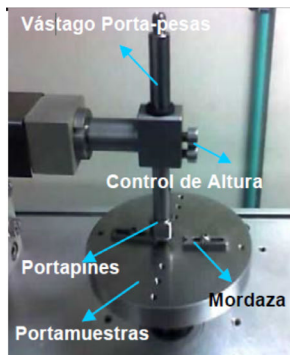


**Figura 2.** Esquema conceptual de un equipo pin-on-disk

El equipo y los elementos que lo componen se describe en la Figura 3 compuesto por un disco giratorio sobre el que se coloca uno de los materiales bajo ensayo y que es cargado a través de un elemento (del otro material bajo ensayo) tipo punzón, bola o superficie plana ( Figuras 4 y 5) por medio de un peso conocido (hasta 60N).



**Figura 3.** Elementos equipo pin on disk.



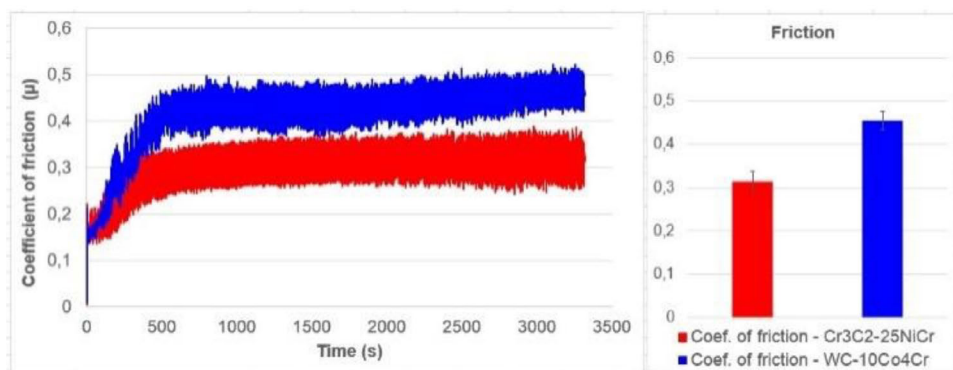
**Figura 4.** Brazo equipo pin on disk



**Figura 5.** Pines tipo esfera, portapines

El sistema es controlable y se puede obtener y registrar diferentes parámetros:

- Fuerza de rozamiento
- Coeficiente de rozamiento
- Desgaste
- Temperatura



**Figura 6.** Gráfica coeficiente de rozamiento por tiempo ejecutado

La figura 6 muestra una de las gráficas que pueden obtenerse a través del ensayo correlacionando el coeficiente de rozamiento con el tiempo de ensayo efectuado sobre dos materiales.

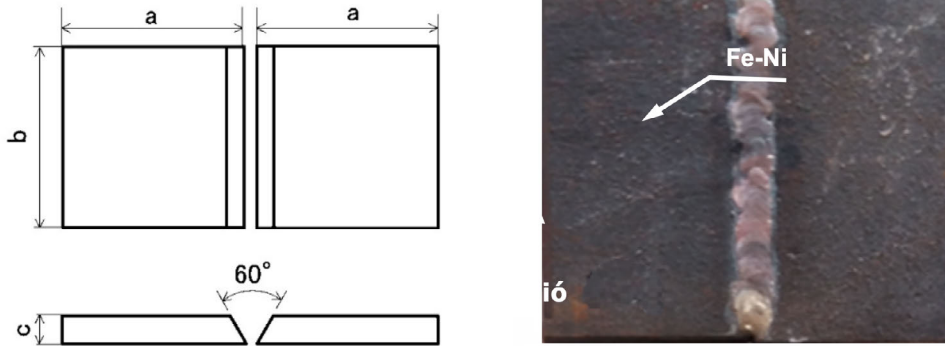
Parte experimental: verificación de una soldadura mediante el método propuesto

En el ejemplo y validación experimental del método se ha basado en el análisis del desgaste de uniones soldadas de fundición nodular (Montero *et al.*, 2008) (Cembrero *et al.*, 2017) (Figura 8).

Este método es aplicable al ensayo de cualquier tipo de soldadura efectuada en la elaboración y montaje de estructuras metálicas, ya sea de acero (material más habitual), como fundiciones (Pascual *et al.*, 2008), como cualquier otro metal soldable.

En particular, los ensayos se efectuarán sobre probetas rectangulares de chapa de fundición de 6 mm de espesor, que una vez preparadas Figura a ( cortadas y rebaje a bisel de 30 °) han sido soldadas mediante soldadura eléctrica y con material de aporte Fe-Ni al 60 %, considerándose éste último por ser o uno de lo más habituales en este tipo de soldaduras ya sean efectuadas mediante técnica tig o smaw (Cárcel-Carrasco *et al.*, 2017) (Pascual *et al.*, 2009).

En la figura b puede observarse una de las placas soldada mediante técnica de soldadura TIG sin precalentamiento y sin tratamiento térmico postsoldado, el cordón se ha formado en dos pasadas, la primera de raíz, y ambas realizadas con movimiento de avance circular, (Alcón *et al.*, 2021) se intenta con ello emular las condiciones externas presentes en el proceso constructivo de las estructuras metálicas en obra.



**Figura 7.** a) Preparación de probeta previo al soldado. b) Cupón soldado.

Para analizar el proceso de desgaste, se ha partido de un equipo Pin on disk (micro-test) como se observa en la Figura 8.



**Figura 8.** Equipo microtest

### Fases del proceso

- Preparación de probetas

Obtenidos los cupones del material formado por las chapas de fundición soldadas, se procede al corte de los mismos según la dirección perpendicular al cordón de soldadura obteniéndose probetas rectangulares de (40 x 100 x 6) mm.

Dichas probetas deben prepararse y someterse a las fases de lijado y pulido según normativa, posteriormente se realiza el montaje de la probeta sobre la máquina de ensayos tribómetro.

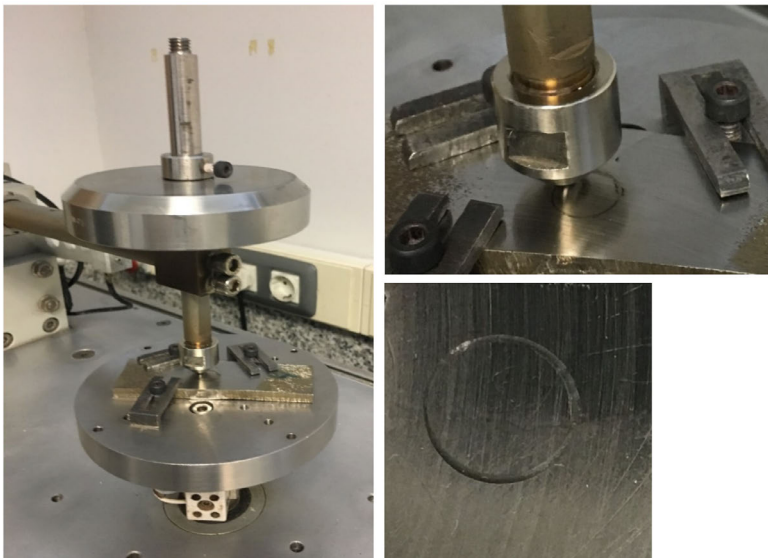
- Colocación y configuración de parámetros de ensayo

Una vez realizado el montaje de las probetas rectangulares sobre la base de la porta muestras circular de la bancada (Figura 9) y fijada a través de las mordazas se procede a configurar los parámetros del ensayo.



**Figura 9.** Ensayo probeta con peso

En la imagen de la figura 9 se puede observar el equipo completo de laboratorio, sobre el plato giratorio se ubica y amordaza la probeta a ensayar, se observa en la figura 7 la colocación de la misma y el portapines



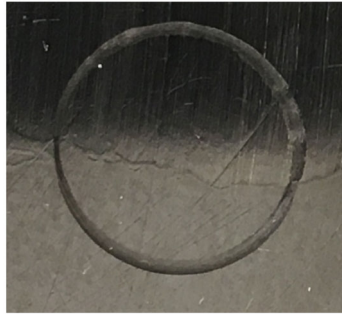
**Figura 10.** Ensayo tribológico con detalle de portapines y huella realizada

- Ensayo con carga

A tal efecto en la experiencia se aplicó una carga de 10 N a cada una de las muestras, el brazo sobre el eje vertical lleva en su extremo, a través del portapines, una bola de acero F-5210 de 5 mm de diámetro, que describe una circunferencia de radio 5mm que abarca tanto la zona de soldadura como del material base ( Figura 10), los parámetros del ensayo se establecen a una velocidad de giro de 60 revoluciones por minuto del plato horizontal y con un recorrido circunferencial de 50 m, obteniéndose una huella Fig. 10 sobre la probeta que indica el desgaste ocasionado.

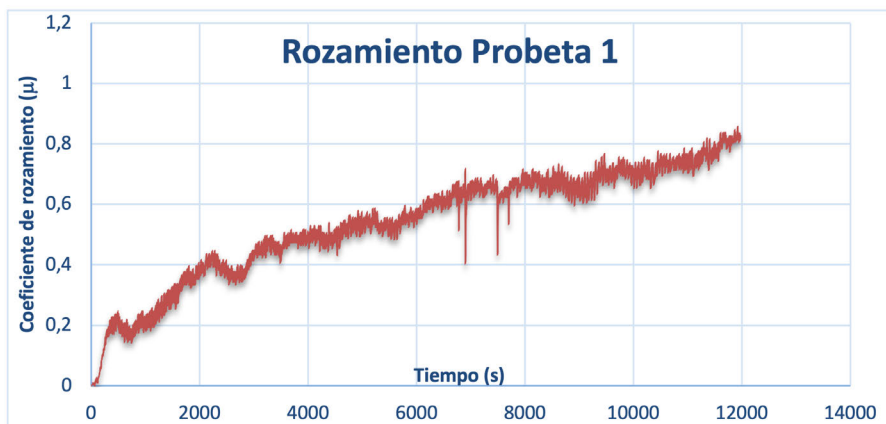
- Análisis del desgaste

A diferente escala de detalle la imagen de la Figura 11 muestra el desgaste y huella realizada por la esfera ubicada en el portapines durante la ejecución del ensayo.



**Figura 11.** Desgaste zona ZAC

Realizado el ensayo pin on disk se observa en gráfica de la Figura 12 el valor obtenido para la probeta que a lo largo del tiempo de realización del ensayo alcanza un coeficiente de rozamiento de 0.82 durante el tiempo que duró el ensayo.

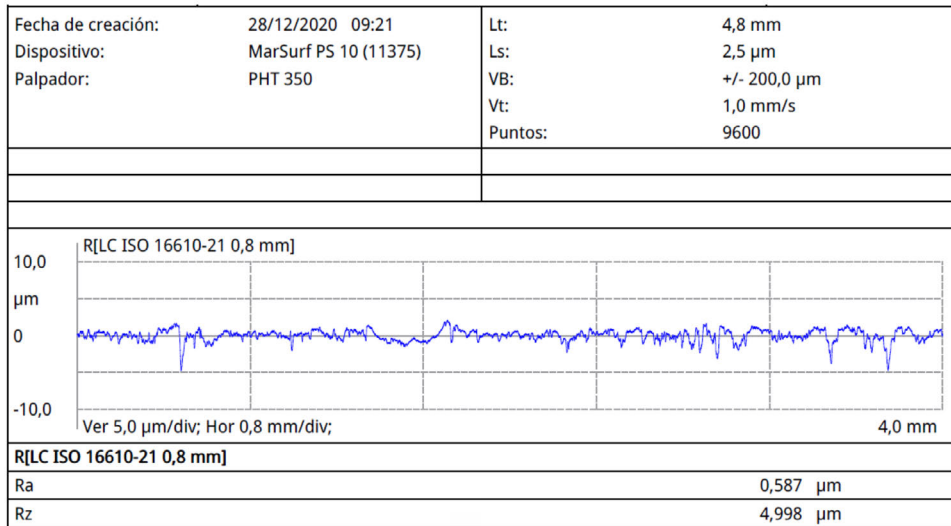


**Figura 12.** Medida de coeficiente de rozamiento por unidad de tiempo.

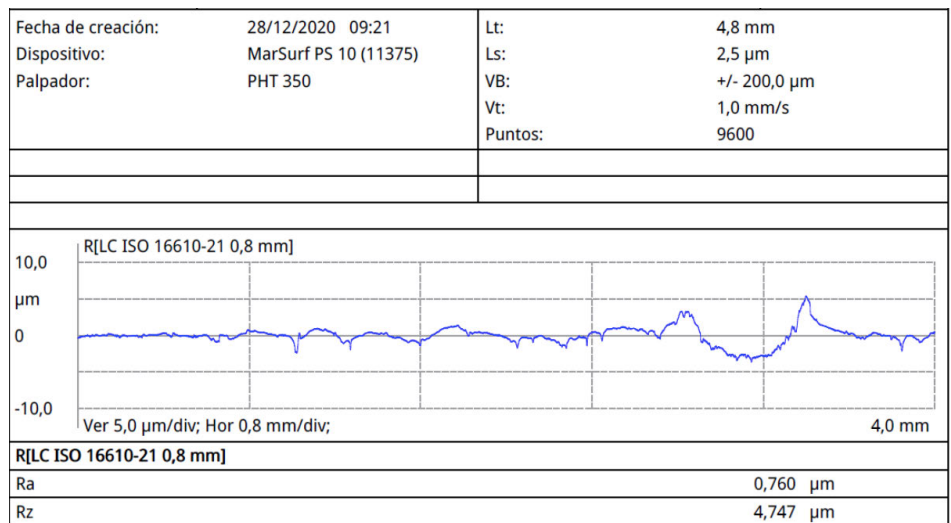
- Cálculo de rugosidad

Para medir el grado de rugosidad expresada en  $\mu\text{m}$ , se ha empleado un rugosímetro digital de la marca MarSurf PS 10 (11375) con palpador PHT 350.

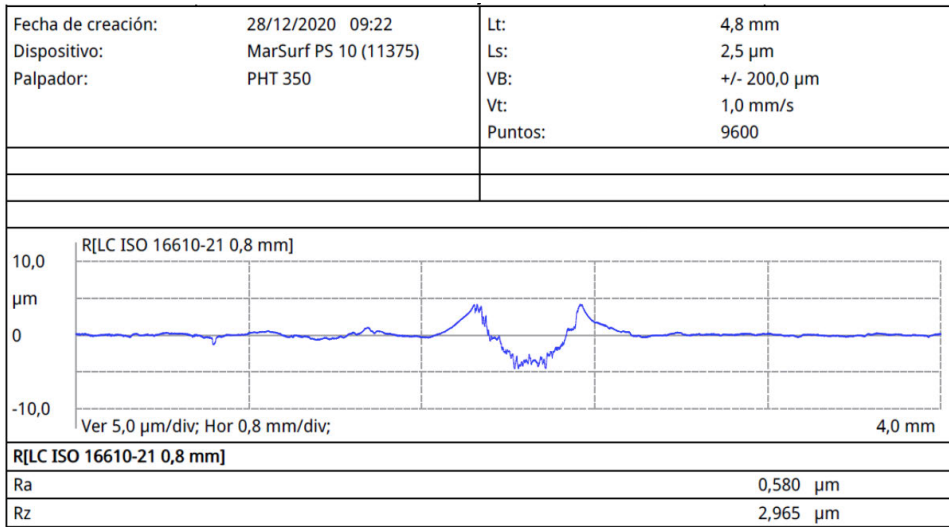
Para la experiencia realizada y comprobada la rugosidad en las difentes zonas de la soldadura se obtienen las gráficas siguientes



a)



b)



c)

**Figura 13.** Medida de la rugosidad en distintas zonas de la unión soldada: ZAC (zona afectada por el calor); interface y cordón de soldadura.

- Obtención del peso de las probetas (balanza)

Finalmente, para un control efectivo del desgaste pueden determinarse las pérdidas de volumen en milímetros cúbicos. La pérdida de masa por desgaste se puede convertir en pérdidas de volumen mediante los valores adecuados de densidad del material utilizado y los pesajes correspondientes de probetas y pines.

## CONCLUSION

Para el caso de uniones soldadas en estructuras metálicas, el método propuesto permite realizar un análisis tribométrico mediante máquina de ensayos “pin on disk” que nos proporciona los datos de rugosidad y permite obtener datos como el coeficiente de fricción por tiempo y desgaste. El método resulta ÚTIL para extrapolar y comparar el desgaste efectuado y comparado con diferentes materiales que interaccionen entre ellos.

En conclusión este método complementa los datos de partida de los materiales proporcionando una lectura superior relacionada con los requisitos técnicos exigibles a los materiales o componentes y a la durabilidad y vida ÚTIL de las estructuras.

## REFERENCES

- Alcón, J. M., Guillamón, M. P., García, L. S., & Vicente, F. S.** (2021). Mechanical and microstructural analysis in the welding of ductile cast iron by TIG procedure, with different filler materials and air cooling. *Revista de Metalurgia*, 57(2), 1–7. <https://doi.org/10.3989/REVMETALM.194>
- ASTM International.** (2017). ASTM G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. In *Annual Book of ASTM Standards*.
- BOE 2019.** (2021). Boletón Oficial del Estado. Boletín Oficial Del Estado, 26798–26800.
- Camba, C., Varela, Á., Blázquez, V., García, A., Mier, J. L., & Barbadillo, F.** (2010). Comportamiento al desgaste de fundiciones tipo “silal.” *Revista de Metalurgia*, 46(EXTRA), 40–46. <https://doi.org/10.3989/revmetalmadrid.04XIIPMS>
- Cárcel-Carrasco, J., Pascual, M., Pérez-Puig, M., & Segovia, F.** (2017). Comparative study of TIG and SMAW root welding passes on ductile iron cast weldability. *Metalurgija*, 56(1–2), 91–93.
- Castillo Herrera, W. P., & Toapanta Cunalata, O. G.** (2019). Principios de tribología aplicados en la ingeniería mecánica. In *Principios de tribología aplicados en la ingeniería mecánica*. <https://doi.org/10.17993/ingytec.2019.57>
- Cembrero, J., Salas, F., Shayan, M., Reserach, S., Hoshino, K., Ebrahimnia, M., & Pascual, M.** (2017). Investigación del comportamiento de uniones soldadas de fundición nodular. 45(2009), 2009–2011.
- EAE.** (2011). Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo, por el que se aprueba la Instrucción de Acero Estructural (EAE). In *Boletín Oficial del Estado*, 23 de junio de 2011.
- F. Díaz.** (2007). *Tribología: fricción, desgaste y lubricación*. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
- Forn-Alonso, A., Baile-Puig, M. T., & Rupérez-de Gracia, E.** (2005). Propiedades tribológicas de los materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con partículas cerámicas. *Revista de Metalurgia*. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2005.v41.iextra.1023>
- Granizo, J.** (2015). *La Tribología y sus aplicaciones en la industria*. CIENCIA UNEMI. <https://doi.org/10.29076/issn.25287737vol3iss4.2010pp64-71p>

- Montero, J., García, A., Varela, A., Zaragoza, S., Artiaga, R., & Mier, J. L. (2008).** Estudio del desgaste de uniones soldadas en tuberías. *Revista de Metalurgia (Madrid)*. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2008.v44.i2.105>
- Pascual, M., Cembrero, J., Salas, F., & Martínez, M. P. (2008). Analysis of the weldability of ductile iron. Materials Letters, Camba, C., Varela, Á., Blázquez, V., García, A., Mier, J. L., & Barbadillo, F. (2010).** Comportamiento al desgaste de fundiciones tipo “silal.” *Revista de Metalurgia*, 46(EXTRA), 40–46. <https://doi.org/10.3989/revmetalmadrid.04XIIPMS>
- Pascual, M., Ferrer, C., & Rayón, E. (2009).** Weldability of spheroidal graphite ductile cast iron using Ni / Ni-Fe electrodes. *Revista de Metalurgia (Madrid)*, 45(5), 334–338. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.0814>
- Santa-Marín, J. F., & Toro-Betancur, A. (2015).** Tribología: pasado, presente y futuro. *Tecnológicas*. <https://doi.org/10.22430/22565337.195>



# DIAGNÓSTICO DEL FALLO EN LAS INSTALACIONES DE BOMBEO EN PISCINAS OLÍMPICAS

**Antonio Manuel Romero Sedó<sup>1</sup>, Paloma Arrué Burillo<sup>2</sup>, Jordi Francesc Romero Miquel<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universitat Politècnica de València, España, [aromeros@csa.upv.es](mailto:aromeros@csa.upv.es)

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de València, España, [paarbu@csa.upv.es](mailto:paarbu@csa.upv.es)

<sup>3</sup>Universitat de València, España, [fmjromero@gmail.com](mailto:fmjromero@gmail.com)

## ABSTRACT

The study focuses on the diagnosis of the failure in the suction installations of the pressure groups in an Olympic swimming pool. Likewise, it is intended to make a work guide to be able to determine the faults in this type of installations. Finally, a practical case is presented as an example and experimental validation of the friction and wear analysis on the welded joint of cast metal sheets welded with a 60% Ni-Fe contribution electrode, finally the conclusions and the derived advantages are exposed from the application of the method to the control and execution of welded joints on site.

**Keywords:** Fault diagnosis, suction lines, pressure groups, fracture, polymers.

## INTRODUCTION

Los fallos de funcionamiento que se suelen detectar en las piscinas olímpicas son MÚLTIPLES, siendo atribuible en la mayoría de los casos a los siguientes factores actuando de forma individual o combinada: mala calidad de aire y del agua, elección incorrecta de los materiales desde el punto de vista de compatibilidad con el agua (Romero *et al*, 2010), así como, de resistencia mecánica, grupos de presión ineficientes y en ocasiones sin NINGÚN tipo de regulación electrónica, sistemas de purificación de aire deficientes, producción escasa de agua caliente sanitaria, filtros inadecuados, carencia o inexistencia de sistemas de control analógico/digital (PLCs, HMI, Scada, etc.), carencia de aislamiento térmico tanto en el vaso como en la edificación, mantenimiento deficiente y en ocasiones inexistente, etc.

Estos fallos son muy comunes en este tipo de instalaciones debido a un mal diseño por parte de los proyectistas, con desconocimiento en las disciplinas de la ingeniería hidráulica, mecánica, materiales, electrónica y química. Esto provoca instalaciones con un elevado coste energético, enfermedades en la piel, ojos, oídos, vías respiratorias etc., y en el peor de los casos a fallos irreversibles del sistema.

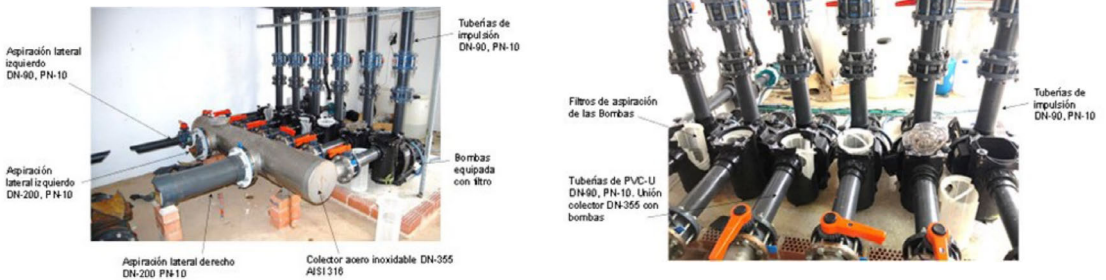
El trabajo que se desarrolla hace referencia a un caso real en unas instalaciones de una piscina olímpica ubicadas en la Comunidad Valenciana, sin indicar datos específicos por razones de protección de datos. En esta ocasión, el fallo fue atribuible al sistema hidráulico con rotura de las tuberías en la línea de aspiración en los grupos de bombeo.

La sala de máquinas estaba formada por los siguientes elementos:

- Instalación hidráulica de siete bombas conectadas en paralelo. Seis de las bombas son iguales de 5.59 kW/cada una y una más de 4.05 kW. Las seis bombas están montadas en grupos de dos, formando lo que en adelante se denominará línea de bombeo 1, 2 y 3. El uso de las 7 bombas se destina a la barredera, el dosificador del floculante y pH, los cloradores salinos, la recirculación del agua en la piscina previo lavado, filtrado y juegos.
- Sistema de filtrado, formado por 3 depósitos de 1800 litros cada uno.
- Cloradores salinos, compuesto por 1 clorador maestro y 3 cloradores esclavos.
- Dosificadores de cloro.
- Cuadros eléctricos y electrónicos.
- Las tuberías del sistema hidráulico formadas por materiales poliméricos de PVC-U SEGÚN la norma UNE 53-11288 con calibres DN-200, 140, 125 y 90, de PN-10. Las válvulas utilizadas en toda la instalación son de material polimérico del tipo de mariposa de cierre un cuarto con palanca metálica y gatillo de posición.

Durante la inspección la instalación hidráulica en el sistema de aspiración presentaba las siguientes patologías: rotura de las tuberías de aspiración principales formadas por material polimérico PCV-U de diámetro nominal DN-200 y 90, figura 1; y rotura de los 6 filtros (uno/bomba) de cada una de las bombas, figura 2.

Las causas que han provocado este fallo se analizan en los siguientes apartados.



**Figure 1.** Detalle de la rotura de las tuberías de aspiración.

**Figure 2.** Detalle de la rotura de los 6 filtros individuales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diagnóstico del fallo

Se han analizado las posibles causas del fallo de las instalaciones estudiando 8 hipótesis o posibles causas del fallo, siendo estas las siguientes:

- Rotura debido a transitorios por cierre instantáneo de válvula/s.
- Rotura debido a los transitorios hidráulicos por rínci de bomba/s.
- Rotura por ataque químico.
- Rotura por biodegradación del material a lo largo del tiempo.
- Rotura por defecto de fabricación.
- Rotura debido a la existencia de iniciadores de fractura.
- Rotura por vibraciones.
- Rotura por estrangulamiento de la/s válvula/s rincipals DN-200 que suministran fluido en la línea de aspiración de los grupos de presión.

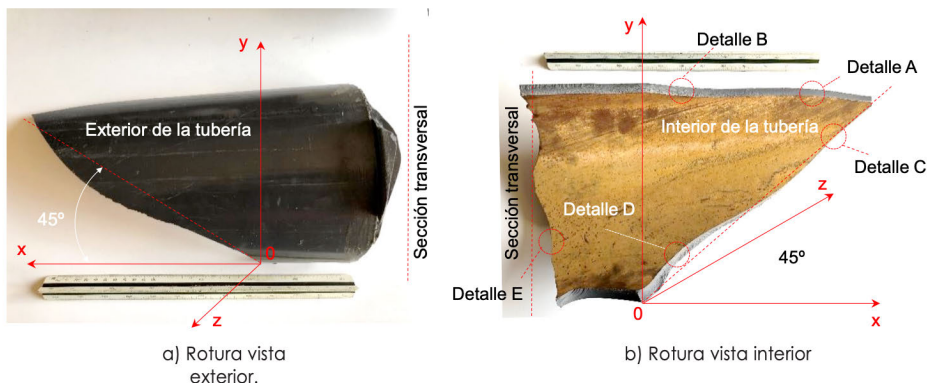
Los resultados obtenidos del análisis de las hipótesis de la 1 a la 7 han sido negativos, quedando por estudiar la hipótesis 8 que se realizará en base al análisis patológico y de los cálculos hidráulicos y mecánicos.

### **Patologías**

En este apartado se analizan por macro y micro morfología las patologías encontradas en los materiales en las líneas de aspiración formada por las tuberías de PVC-U con diámetro nominal DN-200 y DN-90, y en los filtros de las bombas.

## Tubería principal de aspiración

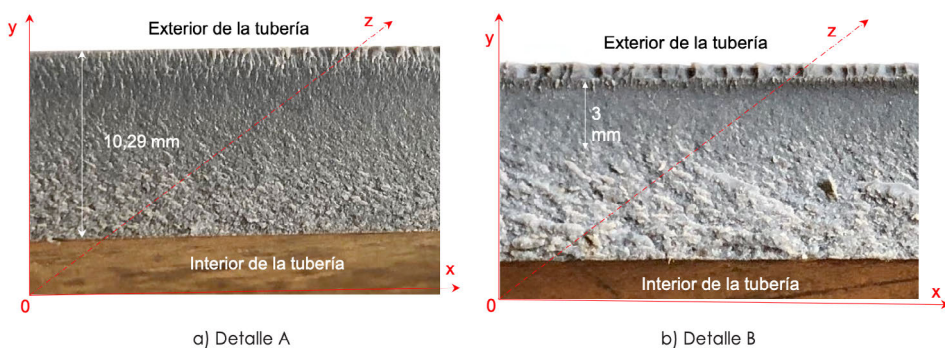
La tubería principal de aspiración formada por material polimérico PVC-U DN-200 y PN-10, con un espesor medio de 10.29 milímetros, presentaba roturas en el eje longitudinal (eje x) con un ángulo a 45° y en el eje transversal (eje y), figura 3.



**Figure 3.** Tubería principal PVC-U DN-200

La rotura a 45° obedece a los esfuerzos que el material ha soportado debido a las tensiones combinadas, es decir, tensiones normales  $\sigma$  y de cortadura  $\tau_{xy}$ . La rotura en la sección transversal es prácticamente perpendicular al eje x, y es debido a la tensión principal  $\sigma$  y tan elevada que ha estado sometido el material.

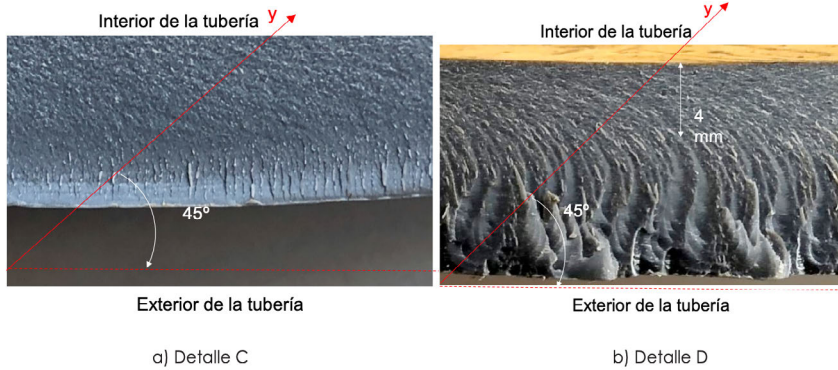
En la figura 4, se han representado los detalles de las roturas A y B respectivamente para un ángulo de rotura de 0°.



**Figure 4.** Detalle A y B de las roturas PVC-U DN-200

La figura 4 a), muestra una rotura frágil en la mayoría de la sección longitudinal del eje x, no obstante, se han encontrado en una parte de la sección de rotura cercana a la sección transversal, signos de ductilidad y de fragilidad, figura 4 b). Con respecto

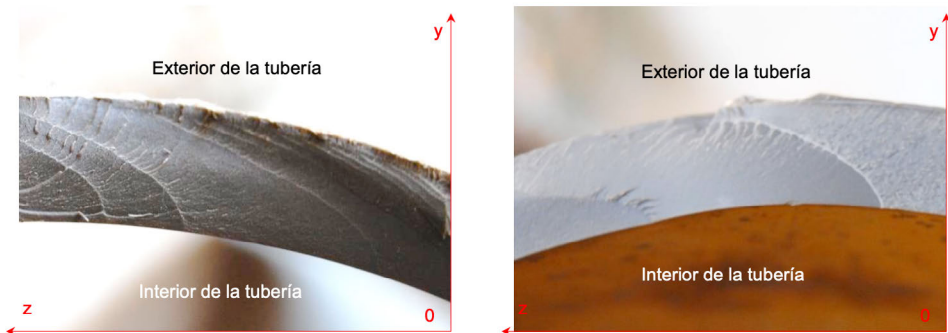
a la sección a  $45^\circ$ , la rotura del material viene dada por la figura 5 correspondientes a los detalles C y D.



**Figure 5.** Detalle C y D de las roturas PVC-U DN-200

En esta sección ocurre algo similar a la sección longitudinal, una gran parte de la sección a  $45^\circ$  es de rotura frágil, (Timoshenko & Gere, 1961), figura 5 a, existiendo una parte de ductilidad con signos de clivaje por fragilidad cercana a la sección transversal, figura 5 b.

Una de las roturas más representativas viene dada por la figura 6, correspondientes a la rotura transversal de la tubería, detalle E.

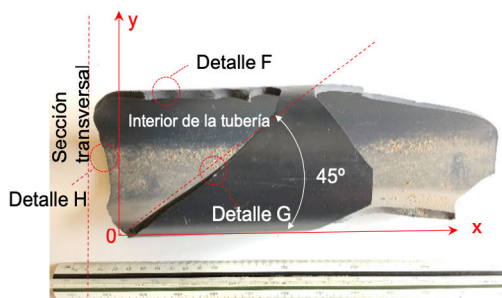


**Figure 6.** Detalle E de las roturas PVC-U DN-200

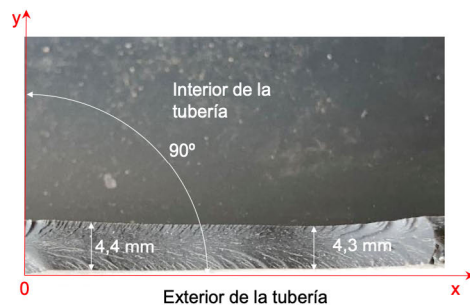
En toda la sección transversal de la tubería polimérica de PVC-U DN- 200, la rotura ha sido del tipo frágil. Se puede apreciar en ambas secciones los ríos de clivaje por fatiga del material, (Giménez, 2006), (Bailey 1985). La dirección de los escalones de clivaje está indicando claramente que la rotura ha sido provocada por depresiones en el interior de la tubería.

## Tubería secundaria de aspiración

La tubería secundaria de la instalación está formada por material polimérico de PVC-U DN-90 PN 10, con un espesor medio de 4.4 milímetros. Al igual que la tubería principal también presenta roturas en el eje longitudinal (eje x) con un ángulo a 45° y en el eje transversal (eje y), figuras 7 y 8.



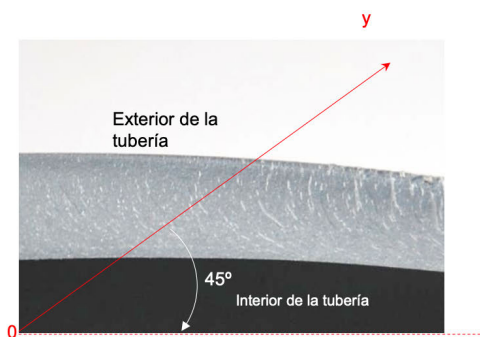
**Figure 7.** Rotura vista exterior



**Figure 8.** Rotura espesor tubería

En la figura 7 la rotura se ha realizado a los 45° debido a las tensiones combinadas (Timoshenko & Gere, 1961), es decir, tensiones normales  $\sigma$  y de cortadura  $\tau_{xy}$ . La rotura en la sección transversal es prácticamente perpendicular al eje x, y es debido a la tensión principal  $\sigma$  y tan elevada que ha estado sometido el material. En la figura 8, se observa una variación del espesor de la tubería debido a una estricción por tracción debido a los esfuerzos en la dirección principal del eje x.

En las figuras 9 y 10, se han representado los detalles de las roturas G y H respectivamente.



**Figure 9.** Detalle G



**Figure 10.** Detalle H

En toda la sección transversal de la tubería polimérica de PVC-U DN- 90, la rotura ha sido del tipo frágil. En la figura 10 se aprecian los ríos de clivaje por fatiga del material, (Giménez, 2006), (Bailey 1985). La dirección de los escalones de clivaje está

indicando claramente que la rotura ha sido provocada por depresiones en el interior de la tubería.

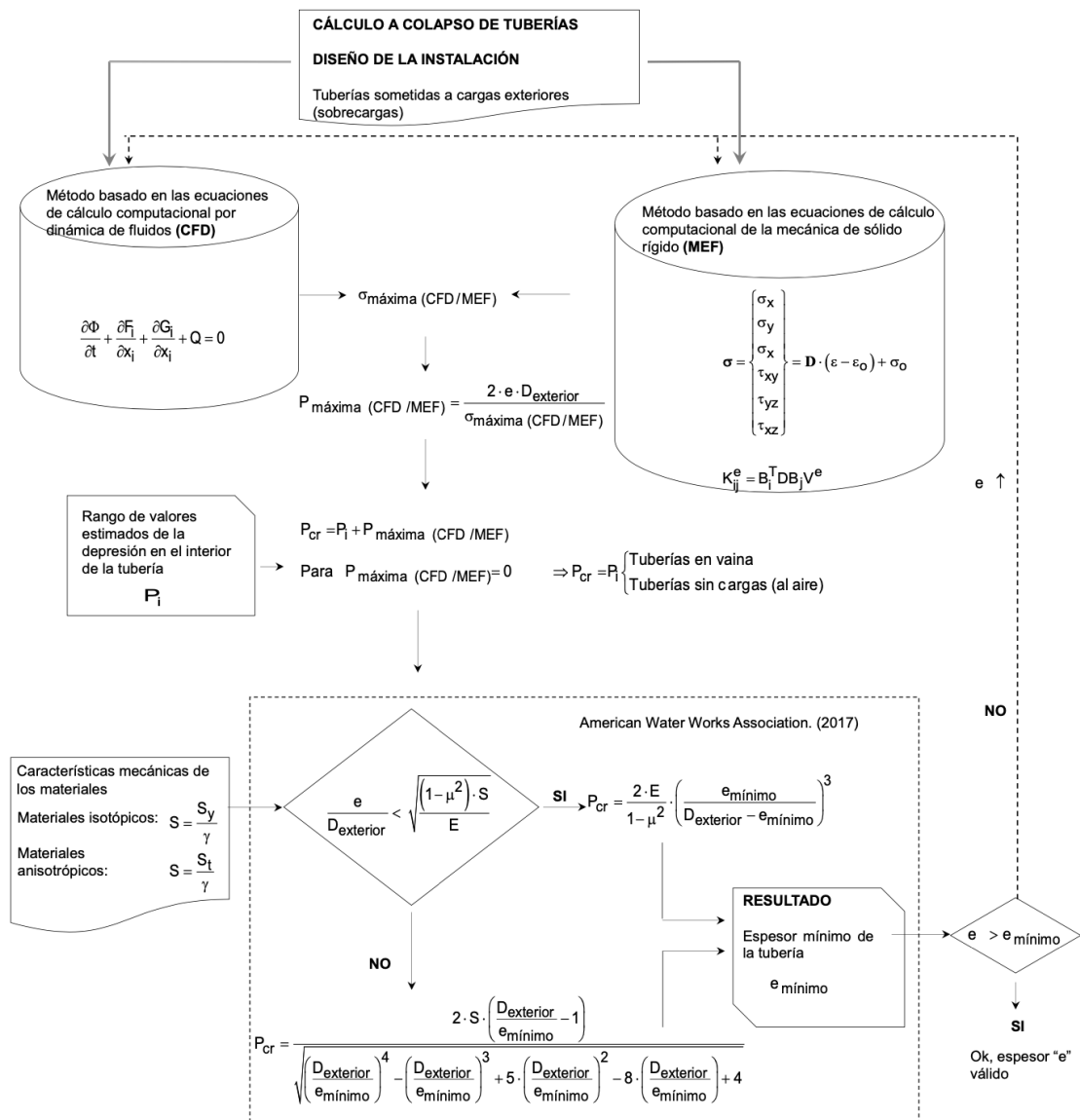
### **Cálculo mecánico e hidráulico**

En base a las patologías de la instalación, los cálculos mecánicos e hidráulicos se han centrado fundamentalmente en dos líneas de investigación:

Por una parte, el cálculo mecánico por colapso en la línea de aspiración por depresión, formada por tuberías poliméricas de PVC-U, DN-200 y 90 cuya presión nominal a presiones positivas es de PN-10.

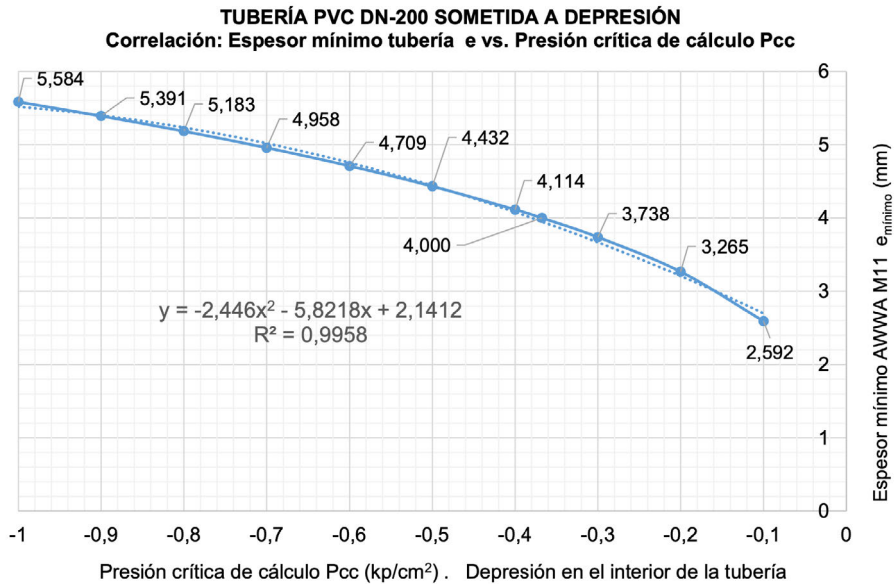
Y por otra parte, el cálculo dinámico del fluido, en toda la instalación mediante simulaciones dinámicas, compuesta por tuberías poliméricas de calibre DN-200, 140, 125, y 90.

Para el cálculo mecánico a colapso se ha utilizado el algoritmo de la figura 11.



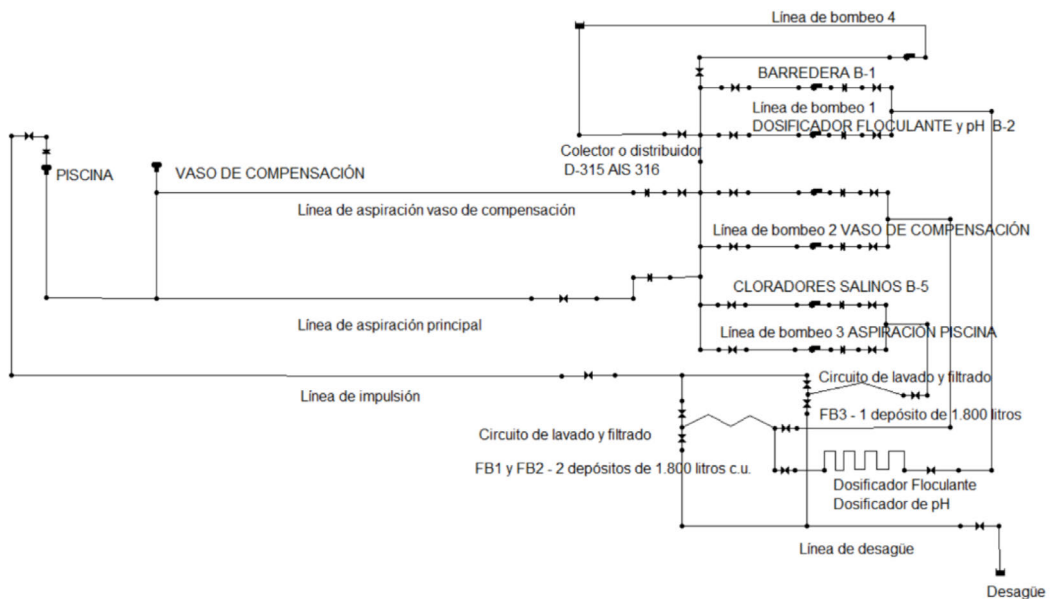
**Figure 11.** Algoritmo cálculo mecánico en tuberías en depresión

Los resultados obtenidos del cálculo en la tubería de PVC-U DN-200 se indican en la figura 12.



**Figure 12.** Resultados de cálculo por colapso

Para provocar la rotura de la tubería es necesario una depresión de  $-0.37 \text{ kp/cm}^2$ , para un espesor obtenido de las patologías de 4 milímetros. Una vez obtenido el valor máximo de la depresión en la que la tubería que ha provocado la rotura por colapso, hay que realizar los cálculos hidráulicos de la instalación para conocer que posibles hipótesis han provocado la depresión, utilizando el software Epanet (Rossman, 2000), cuyo esquema hidráulico viene dado por la figura 13.



**Figure 13.** Esquema hidráulico de la instalación

Se han realizado 8 hipótesis de cálculo, estudiando cada una de las líneas de bombeo por separado y en combinación, con un total de 21 simulaciones y 504 cálculos. Cada una de las bombas de 5.593 kW ha trabajado sin variador de frecuencia a una velocidad de giro constante de 2920 rpm sin ningún tipo de regulación en la impulsión. El algoritmo de cálculo viene dado por la figura 14.

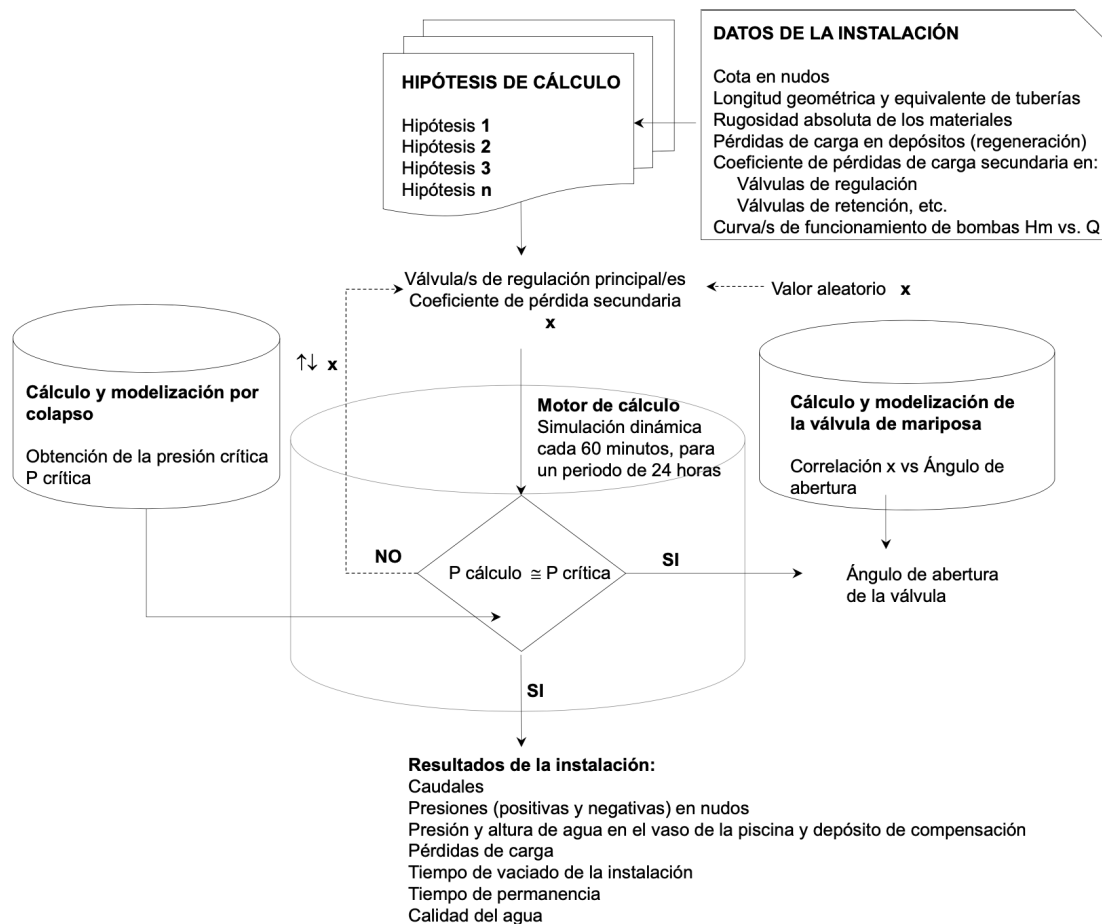


Figure 14. Algoritmo cálculo hidráulico

Los resultados obtenidos de la simulación para una depresión próxima a la de rotura, se han obtenido cuando la válvula de mariposa de la tubería principal de PCV-U DN-200 se encuentra parcialmente cerrada, cuyos valores son, para la línea de bombeo 3 el ángulo es de 20.26°, para la línea de bombeo 2, el ángulo ha sido de 17.67°, y para las líneas de bombeo 2 y 3, el ángulo es de 17.88°.

## CONCLUSION

Del diagnóstico del fallo se desprende que la hipótesis más afín a la rotura de los materiales es debido a causas de presiones negativas en el interior de las tuberías en la línea de aspiración.

Del estudio de las patologías se demuestra que la rotura de los materiales ha sido de forma generalizada siendo del tipo frágil, así mismo, presenta signos de clivaje, lo cual proporciona indicios de que la rotura ha sido progresiva debido a ciclos de fatiga hasta alcanzar un espesor mínimo de 4 milímetros, y es entonces cuando la rotura ha sido SÚBITA. Como conclusión del cálculo hidráulico, para que se produzca la rotura de las tuberías de aspiración se han tenido que manipular las válvulas de mariposa principales, es decir, se ha disminuido la sección de la vena líquida.

Como resumen de las conclusiones, las instalaciones hidráulicas del grupo de bombeo o recirculación de la piscina ha sido provocado, por ciclos de fatiga por variación de las presiones negativas internas en el interior de las tuberías de aspiración, provocadas por el cierre parcial de la válvula/as de mariposa DN-200 y DN-90.

## REFERENCES

- American Water Works Association.** (2017). Steel pipe design and installation. (A. W. W. Association (ed.); 2nd ed.). Denver, Colorado: American Water Works Association, 2017.
- Bailey, J.** (1985). Fracture mechanics of polymers: Edited by: J.G. Williams Ellis Horwood Ltd (1984) 302 pp £30.00 [Review of Fracture mechanics of polymers: Edited by: J.G. Williams Ellis Horwood Ltd (1984) 302 pp £30.00]. International Journal of Fatigue, 7(2), 121–122. Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(85\)90045-3](https://doi.org/10.1016/0142-1123(85)90045-3)
- Giménez, C. F.** (2006). Diagnóstico del comportamiento en servicio de materiales. Editorial UPV.
- Rossman, L.** (2000). EPANET. Software That Models the Hydraulic and Water Quality Behavior of Water Distribution Piping Systems. Cincinnati, OH 45268: U.S. Environmental Protection Agency (EPA). <https://www.epa.gov/water-research/epanet>

**Romero-Sedó, A. M., Arrué-Burillo, P. & Cárcel, A. C.** (2010). Elección de los materiales para el transporte de agua potable en base a la calidad del agua y análisis factorial de las variables de diseño en  $2^4$ . Boletín informativo (Sociedad Española de Materiales), 575-578.

**Timoshenko, S. P. & Gere, J. M.** (1961). Theory of elastic stability (2a. ed.). McGraw-Hill.

# HORMIGONES DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL: LOS GEOPOLÍMEROS. EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA

**Lliso-Ferrando, Josep Ramon<sup>1\*</sup>, Martínez Ibernón, Ana<sup>1</sup>, Gasch, Isabel<sup>1</sup>, Valcuende, Manuel<sup>2</sup>, Gandía-Romero, José Manuel<sup>1,2</sup>, Soto, Juan<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>IDM - Instituto Interuniversitario de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico. Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. \*E-mail: [jollife2@arq.upv.es](mailto:jollife2@arq.upv.es)

<sup>2</sup>Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.

## ABSTRACT

El hormigón armado es el material de construcción más utilizado en el mundo actualmente debido a su versatilidad y sus propiedades mecánicas. Sin embargo, una de sus principales desventajas es la emisión de CO<sub>2</sub> que se genera durante la fabricación de sus componentes, concretamente del cemento. Debido a esto, son muchos los autores que han tratado de buscar alternativas lo suficientemente fiables y que consigan reducir el impacto medioambiental generado durante su fabricación. En este estudio se analizará en detalle una de estas variantes, los geopolímeros. Durante la fabricación de los geopolímeros se sustituye en el amasado el cemento (OPC, Ordinary Portland Cement) por aluminosilicatos, los cuales son activados con una solución alcalina que sustituye el agua de amasado. Los aluminosilicatos son compuestos que proceden del desecho de otros procesos industriales, como la ceniza volante o la escoria de altos hornos. De esta forma, se sustituye el compuesto más contaminante de los OPC por un material reciclado, lo que incrementa el grado de sostenibilidad de estos materiales y reduce el impacto medioambiental.

En este trabajo se analizará la influencia de las condiciones de curado (temperatura y humedad) en la resistencia a compresión de diferentes tipos de geopolímeros, y se compararán con varios hormigones. Para la fabricación de los geopolímeros descritos en este estudio se utilizará ceniza volante como aluminosilicato e hidróxido de sodio como disolución alcalina para activarlo.

**Keywords:** Geopolímeros, hormigón, sostenibilidad, condiciones de curado, resistencia a compresión.

## **INTRODUCTION**

El hormigón es el material de construcción más utilizado del mundo, con un consumo mundial de cerca de 3600 millones de toneladas anuales. La previsión en el futuro es de este dato siga incrementando hasta los 5 billones de toneladas en 15 años. Su fiabilidad y durabilidad junto con la versatilidad que ofrece y su bajo coste son las claves de su éxito (Mohammed, 2012). Sin embargo, uno de los principales inconvenientes que este material presenta es la contribución del sector que lo fabrica a la emisión de gases de efecto invernadero.

A pesar de los diferentes estudios en busca de alternativas fiables para la producción de hormigón, el proceso de obtención del Cemento Portland Ordinario (OPC de sus siglas en inglés “Ordinary Portland Cement”) sigue siendo uno de los procesos más contaminantes. De este proceso industrial, se estima que se generan entre un 5 y 7 % del total de emisiones de CO<sub>2</sub> que se emiten a la atmósfera anualmente. Esto se genera durante la calcinación de la piedra caliza para la obtención del Clinker, el cual es un proceso altamente contaminante, además de que requiere un alto consumo de energía y recursos naturales (Albornoz, 2015; Louise, 2013).

Este gran inconveniente ha generado que la industria de la construcción y la investigación haya tratado de buscar alternativas eficaces y de similares características, pero que reduzcan considerablemente la contaminación en el proceso de producción de los diferentes materiales de construcción. Una de las alternativas que aparece en este abanico de posibilidades y que más éxito ha cosechado en los últimos años son los geopolímeros, un sustituto del hormigón, mucho más sostenible y que aprovecha residuos de otros procesos industriales, lo que aumenta su eficiencia (Louise, 2013).

El cemento geopolimérico es un conglomerante sintético inorgánico, el cual se obtiene de aluminosilicatos, los cuales, activados mediante una solución alcalina, generan el proceso denominado geopolimerización (Tejedor, 2018).

Como fuente de aluminosilicatos se emplean residuos obtenidos de otros procesos industriales, como la escoria de alto horno y la ceniza volante. Otras adiciones, como la puzolana natural o el metacaolín también han sido estudiadas, pero con menos éxito. Se trata de materiales de deshecho que no tienen ningún uso y con los geopolímeros se plantea su reutilización (Davidovits, 2015; Živica, 2014; González, 2012).

A pesar de que los geopolímeros han sido extensamente estudiados en numerosas ocasiones, existen muchas variables que no han sido analizadas con el suficiente detenimiento. En este trabajo se recoge un estudio comparativo de la evolución de la resistencia a compresión de diferentes tipos de geopolímeros sometidos a diferentes condiciones de curado. Los resultados obtenidos se comparan con dos hormigones convencionales.

## **PLAN EXPERIMENTAL**

### Preparación de los materiales

Para el desarrollo experimental de este estudio se ha optado por la utilización de un cemento geopolímero en el que se han utilizado como aluminosilicato la ceniza volante, y como activador el hidróxido de sodio.

Las cenizas volantes hacen referencia a un desecho generado por las centrales termoeléctricas durante la quema del carbón para evaporar agua y poner en movimiento turbinas que generen electricidad. Estos residuos generados por la combustión se dividen en cenizas volantes o del hogar, dependiendo del tamaño de sus partículas. Las más finas, las cenizas volantes, serán las que se empleen en la conformación de los hormigones geopolímeros de este trabajo experimental. Su composición está formada por óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio. Actualmente, la producción de cenizas de este tipo ha caído un 85% en los últimos 20 años, debido a que se ha reducido considerablemente la utilización de hornos de carbón para generar electricidad en las centrales termoeléctricas. Aun así, se aprovecha más de la mitad de este tipo de residuos del que se aprovechaba hace 30 años.

La ceniza volante es una fuente de aluminosilicatos, con fases de sílice y alúmina en elevada cantidad. Además, la adición de ceniza volante en el hormigón permite la reducción de la reacción álcali-agregado, la cual genera compuestos expansivos que acaban dañando gravemente las estructuras de hormigón armado.

Como activador de los aluminosilicatos, el cual debe tener un bajo contenido en calcio, se deben emplear soluciones alcalinas bajas en dicho mineral. Los más empleados, gracias a su relativa facilidad para su obtención son, el Silicato Sódico ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), el Carbonato Sódico ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), el Sulfato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) y el Hidróxido de Sodio ( $\text{NaOH}$ ), solución empleada para este experimental.

Además, para poder comparar los resultados obtenidos, se incluyeron en este estudio experimental dos hormigones convencionales de 32.5 y 42.5 MPa de resistencia.

Estos hormigones, junto con los cementos geopolímeros presentados anteriormente, se amasaron en los laboratorios de materiales de construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación (ETSIE) de la Universitat Politècnica de València (UPV). Las dosificaciones utilizadas se recogen en al table 1 para los hormigones convencionales y en la Tabla 2 para los geopolímeros. Las dosificaciones están referenciadas a 1 metro cúbico del material indicado. Como se puede ver, de los hormigones geopolímeros se dividieron en dos dosificaciones diferentes, según su relación agua-cemento.

Para llevar a cabo este estudio de manera adecuada, se fabricaron con todas las dosificaciones probetas cúbicas de 10 cm de lado. Por cada uno de los hormigones convencionales, Cem 32.5 y Cem 42.5, y del Geopolímero G\_1, se amasaron 9 probetas de cada. De la segunda dosificación de Geopolímeros (G\_2), se amasaron 18 probetas. Además, y para realizar estudios complementarios a este trabajo, por cada dosificación se fabricaron 3 probetas prismáticas (4x4x16 cm).

|                                  | Cem 32.5 | Cem 42.5 |
|----------------------------------|----------|----------|
| Relación agua/cemento            | 0.5      | 0.5      |
| Cemento Portland CEM II 32.5 B-L | 500      | 250      |
| Cemento Portland CEM I 52.5      | -        | 250      |
| Agua                             | 250      | 250      |
| Árido                            | 1508     | 1507     |

**Tabla 1.** Dosificaciones utilizadas para la fabricación de los hormigones convencionales (kg/m<sup>3</sup> de hormigón).

|                                      | G_1  | G_2  |
|--------------------------------------|------|------|
| Relación disolución/aluminosilicatos | 0.5  | 0.4  |
| Ceniza volante                       | 670  | 672  |
| Disolución NaOH                      | 335  | 270  |
| Árido                                | 1153 | 1315 |
| Árido                                | 1508 | 1507 |

**Tabla 2.** Dosificaciones utilizadas para la fabricación de los geopolímeros (kg/m<sup>3</sup> de geopolímero).

## Desmoldado y Curado

Debido a que la finalidad de este estudio era identificar la posible influencia de la temperatura de curado en la resistencia a compresión de los diferentes materiales geopoliméricos, cada una de las amasadas expuestas anteriormente fueron curadas en diferentes ambientes y etapas, diferenciadas según las fechas de rotura. Los ensayos de compresión se realizaron a 7, 14 y 28 días, y otro más a 90 días ( y que todavía no se han llevado a cabo).

Las probetas de las amasadas Cem 32.5 y Cem 42.5, correspondientes a hormigones ordinarios de cemento portland, se almacenaron en una cámara de curado los primeros 28 días, que corresponden a las 3 primeras fases del plan experimental. Las condiciones de esta cámara eran de una temperatura constante de 20 °C y humedad relativa superior al 90-95%.

Las probetas fabricadas con la dosificación G\_1 se dividieron en dos subgrupos, 1 y 2. El primero se incluyó en la cámara de curado, a 20 °C y humedad relativa superior al 90% durante las tres primeras etapas. En cambio, el segundo grupo se mantuvo durante una primera etapa de 7 días en esta misma cámara y, posteriormente, a los 7 días, fueron trasladadas y almacenadas a una cámara de curado con una temperatura constante de 65 °C y una humedad relativa del 100%.

Por otro lado, las probetas de la amasada G\_2 fueron dividieron en tres subgrupos (1,2 y 3). Las primeras se mantuvieron durante los primeros 28 días en la cámara de curado, a 20 °C y humedad relativa superior al 90%. Las segundas fueron trasladadas a partir de la etapa 2 a la cámara de curado de temperatura 65 °C y humedad relativa del 100%. Por ultimo, el tercer subgrupo se mantuvo los 28 primeros días tras el amasado en esta última cámara (65 °C y humedad relativa del 100%).

A los 28 días, todas las probetas se almacenaron en condiciones de laboratorio, en un ambiente con una temperatura  $22 \pm 2$  °C y humedad relativa aproximada del 60%, hasta la edad de 90 días, finalización de la última etapa con rotura a compresión (no realizada todavía a fecha de entrega de este documento).

En la Tabla 3, se recoge un resumen de las etapas y el tipo de curado de cada uno de los subgrupos de las amasadas enunciadas anteriormente.

|          | <b>Etapas 1<br/>(0-7 días)</b> | <b>Etapas 2<br/>(7-14 días)</b> | <b>Etapas 3<br/>(14-28 días)</b> | <b>Etapas 4<br/>(de 28 a 90 días)</b> |
|----------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Cem 32.5 |                                |                                 |                                  |                                       |
| Cem 42.5 |                                |                                 |                                  |                                       |
| G_1_A    |                                |                                 |                                  |                                       |
| G_1_B    |                                |                                 |                                  |                                       |
| G_2_A    |                                |                                 |                                  |                                       |
| G_2_B    |                                |                                 |                                  |                                       |
| G_2_C    |                                |                                 |                                  |                                       |

\*Rojo: curado en cámara de curado (20°C y Humedad Relativa (H.R.) 90-95%. Azul: curado a altas temperaturas (65°C y H.R. 100%). Verde: curado en condiciones de laboratorio (22°C y H.R. 60%).

**Tabla 3.** Condiciones de curado de cada una de las amasadas.

Tras su fabricación, durante las primeras 24 horas las probetas fueron almacenadas en condiciones de laboratorio. Tras este periodo, todas las probetas se desmoldaron y se trasladaron a las cámaras de curado con las condiciones anteriormente descritas. Sin embargo, las probetas de los grupos G\_1\_A y G\_2\_A tuvieron que ser desmoldadas a los 7 días del amasado debido a que estaban todavía en un estado no endurecido. A los 7 días, tal y como se muestra en la Figura 1, no se encontraban endurecidas del todo (los dedos de la mano quedaban marcados en la superficie de las probetas).



**Figura 1.** Probetas en estado no endurecido y máquina de ensayo.

Ensayo de resistencia a compresión

El desarrollo experimental de este estudio estableció una serie de fechas en las que se ensayaría la resistencia a compresión de dos probetas de cada tipo. A 7, 14 y 28 días, y posteriormente, otra rotura a los 90 días (que a fecha de entrega de este trabajo no se ha realizado todavía). De esta forma, se obtuvo un registro de la evolución

de la resistencia a compresión de las probetas a lo largo de su periodo de curado . El objetivo de este trabajo fue establecer una curva de evolución del comportamiento de la misma.

Los ensayos de resistencia a compresión se realizaron en el laboratorio de materiales de construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación (ET-SIE) de la Universitat Politècnica de València (UPV) mediante una prensa hidráulica, modelo PEF 150HDA. El software del propio equipo fue programado para recoger los datos del tiempo del ensayo, la fuerza aplicada, y la resistencia en Mega Pascales de la probeta ensayada. (Figura 2)

En los siguientes links se pueden visualizar algunos de los ensayos realizados (Figura 2):



**Figura 2.** Enlaces a vídeos donde visualizar algunos de los ensayos a compresión llevados a cabo.

## Resultados

A continuación, en la Tabla 4, se recogen los valores obtenidos mediante el ensayo de resistencia a compresión previamente enunciado.

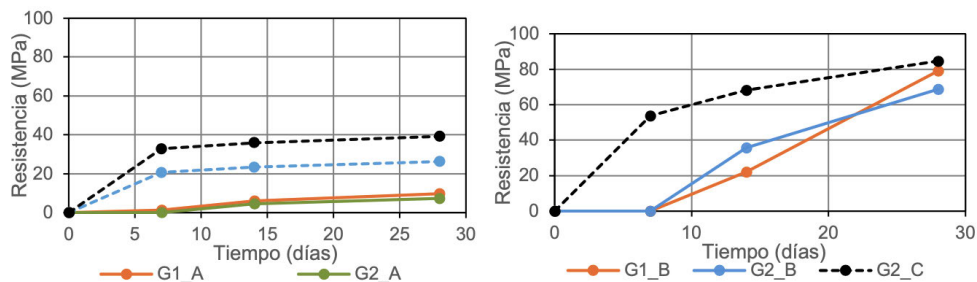
|          | 7 días | 14 días | 28 días | 90 días |
|----------|--------|---------|---------|---------|
| Cem 32.5 | 20.60  | 23.440  | 26.25   | **      |
| Cem 42.5 | 32.75  | 35.89   | 39.20   | **      |
| G_1_A    | 1.30   | 5.93    | 9.71    | **      |
| G_1_B    | *      | 22.02   | 79.06   | **      |
| G_2_A    | *      | 4.62    | 7.32    | **      |
| G_2_B    | *      | 35.62   | 68.74   | **      |
| G_2_C    | 53.82  | 68.10   | 84.65   | **      |

\*Ensayo no realizado debido a que la probeta no se encontraba todavía en un estado de endurecimiento apropiado para realizar el ensayo. \*\*Ensayo no realiza todavía a fecha de entrega de este documento.

**Tabla 4.** Resultados (MPa) obtenidos a las distintas edades de ensayo.

Una vez obtenidos los datos de resistencia, se pudo analizar detenidamente cada uno de los grupos estudiados. Tal y como muestran los resultados obtenidos, la evolución de los hormigones con cemento portland ordinario no llegó a la resistencia esperada de 32.5 y 42.5 MPa respectivamente. Por otro lado, se puede apreciar como los grupos de geopolímeros presentaron un comportamiento totalmente distinto según la temperatura de curado. Las condiciones de curado a temperatura de 20 °C impidieron que las probetas alcanzaran valores de resistencia apropiados. Sin embargo, aquellas probetas cuyo curado se llevó a cabo a altas temperaturas alcanzaron valores de resistencia mucho más altos, triplicando la obtenida en los hormigones convencionales.

En las Figuras 3 y 4 puede apreciarse la evolución de cada una de las probetas, por un lado las que se mantuvieron los primeros 28 días a temperatura de curado de 20°C, y, por otro lado, las muestras curadas a 65 °C respectivamente.



**Figuras 3 y 4.** Evolución de la resistencia a compresión en MPa de las probetas a cada una de las edades ensayadas.

Como se puede apreciar en las gráficas anteriores, las probetas desarrollaron gran parte de su resistencia los primeros 7 días, mientras que en los 21 siguientes, el aumento de la resistencia apenas fue significativo. A los 3 meses se espera comprobar que la evolución de la resistencia se ha mantenido constante.

Los resultados obtenidos también permiten apreciar el incremento significativo de la resistencia a compresión de las probetas curadas en altas temperaturas. Los geopolímeros curados a 20 °C apenas desarrollan una resistencia apta para su uso en construcción, mientras que los curados a 65 °C triplican la resistencia a compresión de los hormigones convencionales.

El comportamiento que desarrollan las probetas G1\_B y G2\_B es también interesante: probetas que los primeros 7 días, y con un curado a baja temperatura apenas desarrollaron resistencia. A partir de los 14 y con un cambio de curado, el cual pasó

a ser a altas temperaturas, y donde las probetas llegaron a alcanzar valores de resistencia que duplican la resistencia de los hormigones convencionales.

## CONCLUSION

Con los resultados obtenidos, se puede afirmar que la temperatura de curado influye significativamente en la resistencia de los hormigones geopolímeros. Una temperatura de curado alta junto con una humedad del 100% permite alcanzar resistencias muy altas para este tipo de hormigones, llegando a triplicar las resistencias de los hormigones convencionales. Por tanto, aunque los geopolímeros no han sustituido al hormigón armado en la actualidad, suponen una alternativa real. Además, este tipo de hormigón es mucho más sostenible, eficiente, limpio y permite reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, mayoritariamente debido a la producción del cemento, sustituido en el amasado de este tipo de materiales por residuos obtenidos de otros procesos industriales. Por tanto, este proceso también permite favorecer el reciclaje de materias de deshecho y reducir los residuos generados.

Como conclusión, y para una posible línea de investigación futura, el estudio de la evolución de la resistencia de estos materiales a muy temprana edad, durante los 7 primeros días, podría ayudar a encontrar posibles usos a estos materiales enfocados al sector del prefabricado.

## ACKNOWLEDGEMENT

Los autores quieren agradecer a la Universitat Politècnica de València la concesión de la beca pre-doctoral PFI (Formación de Personal Investigador) a Josep Ramon Lliso Ferrando (FPI-UPV-2018). También al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España por la concesión de la ayuda pre-doctoral FPU (Formación de Personal Universitario) a Ana Martínez Ibernón (FPU 16/00273).

## REFERENCES

**Albornoz Muñoz, J.**, Cálculo de la huella de carbono para la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile, Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias y Matemáticas, 2015.

**Davidovits, J.**, Geopolymer Chemistry and Applications, ISBN: 9782951482098

**González Acuña, R.**, Caracterización de geopolímeros de base ceniza volante y escoria granulada de alto horno, 2012, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

**Louise, K., Turner, Frank G. Collins.**, “Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete”, *Construction and Building Materials*, 2013, vol 43, no. 1, pp.125–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>

**Mohammed, S., Imbabi, Collette, C. & McKenna, S.** “Trends and developments in green cement and concrete technology”. *International Journal of Sustainable Built Environment* (2012) 1, 194–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2013.05.001>

**Tejedor Montagud, J.** La necesidad de nuevos hormigones para una construcción más sostenible: Los Geopolímeros, Universitat Politècnica de València. 2018.

**Živica, V., Palou, M., Križma, M.**, “Geopolymer cements and their properties: a review”. *Building Research Journal*, 2014, vol 61, no. 2, pp385-100. DOI:10.2478/brj-2014-0007

# ENHANCEMENT OF THE REINFORCEMENT CONCRETE STRUCTURES BY MEANS OF SMART MONITORING SYSTEMS

**Martínez Ibernón, Ana<sup>1</sup>, Lliso-Ferrando, Josep Ramon<sup>1\*</sup>, Gasch, Isabel<sup>1</sup>, Valcuende, Manuel<sup>2</sup>, Gandía-Romero, José Manuel<sup>1,2</sup>, Soto, Juan<sup>1</sup>.**

*<sup>1</sup>IDM - Instituto Interuniversitario de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico. Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. \*E-mail: [anmarib@arqt.upv.es](mailto:anmarib@arqt.upv.es)*

*<sup>2</sup>Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.*

## ABSTRACT

The increasement of the structure's services-life plays a significant role in saving resources, carbon-footprint decreasement and reduction of building and demolition wastes. Facts that have huge impact in the sustainable society development.

Considering this, the monitoring systems are ones of the most effective measures to achieve the extension of the structures service-life in order to increase the sustainability in this sector. In the case of the Reinforcement Concrete Structures (RCS) the implementation of embedded voltametric sensors like monitoring system would be the most suitable. These sensors allow creating smart sensors networks, recollecting the most quantity and accurate information as is possible of the RCS, this produces the optimisation of the maintenance and refurbishment actions, reducing the resources employed in these tasks.

In this study is presented a proposal of very effective smart monitoring system to control the durability of the RCS. This system is capable to estimate parameters very correlated with the corrosion phenomena such as: oxygen permeability, humidity availability variations, pH and concentration of chlorides in the concrete pore solution. Being the corrosion, ones of the main phenomenon of lost durability in RCS.

**Keywords:** Sensors, monitoring, smart grids, durability.

## INTRODUCTION

Considering the current socio-economic context, the sustainable development of the cities is very important (Naik,2008). In order to get this, the increasement of the structure's services-life plays a significant role in the saving of resources, carbon-foot-

print decreasement and reduction of building and demolition wastes (Naik,2008). Indirectly the rise of the structures service-life reduces the energy consume and the heat emissions, these are one of the mainly objectives in the Horizon 2020, due to the construction is energy-intensive industry (Global Energy Review ,2020).

In order to achieve the extension of structures service-life to improve the sustainability in this sector (Naik,2008), the monitoring systems are ones of the most effective measures. In the case of the Reinforcement Concrete Structures (RCS) the implementation of embedded sensors as monitoring system would be the most suitable (Duffó *et al*,2009; Gandía-Romero *et al*,2016). The sensor system configured by voltametric sensors have a great potential (Alcañiz *et al*,2011; Gandía ,2014). In these sensors are applied a potential sweep, favoring the reaction of the different substances contained in the concrete pore solution with the sensor surface. Through the response signal it is possible to identify and quantify the presences of aggressive agents in the concrete pore solution, also will be possible to develop forecasting models.

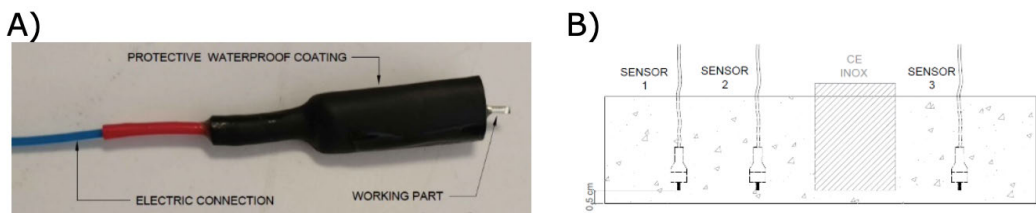
With this type of sensors, it is possible to create “Smart Multisensory Grids” (SMG), enhancing the discrimination and the quantification powers of the system. Also is possible to process the data through the multivariate statistical protocols such as Principal Component Analysis (PCA) (Campos,2013) increasing the accuracy and quantity of information obtained with the system. These models include both initiation and propagation period, defined in the Tutti, K. corrosion model (Tutti,1982). Being these facts very significant in the incensement of the sustainability in the life cycle of our structures because the following facts: the causes of durability lost can be determinate early reducing the energy and material resources employed in the repair of the damages, it supposes a decreasement in the carbon footprint of the structure and also will be ensured the extension of their service life.

In this report is showed an initial prototype of SMG, this system is capable to detect different concrete conditions: variations in oxygen and humidity availability, chlorides presences and concrete carbonation. Furthermore, through the system is possible to estimate these parameters, being all of them critical factors in the corrosion kinetics. Corrosion is one of the mainly durability lost causes in the RCS (Ramón.2019).

## EXPERIMENTAL

### Sensors and samples

Were performed the voltammetric sensors that conforms the multisensor–system. The sensors were manufactured as is depicted in Figure 1-A, was used different metals selected in previous works. The average surface of the sensors was  $0.07 \pm 0.02$  cm<sup>2</sup>. These sensors were embedded in prismatic concrete samples of 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup>. The sensors were located approximately 0.5 cm depth from the bottom surface of the sample, Figure 1-B.



**Figure 1.** A) Sensor. B) Silver voltammetric sensor.

In order to ensure the statistical "goodness" of the study, three mixes were made, preparing one sample for each mix. The total number of samples were 9. And the number total of sensors was 18.

The samples were manufactured with a standard concrete (C30) specified in the Table 1.

| MATERIALS           | Kg/m <sup>3</sup><br>concrete |
|---------------------|-------------------------------|
| Cement I 42.5 R-SR5 | 315                           |
| Water               | 189                           |
| Superplasticizer    | 2.2                           |
| Silica Sand         | 1212                          |
| Coarse Aggregate    | 653                           |
| $f_{ck}$            | 30MPa                         |

**Table 1.** Composition of w/c=0.6 concrete

The concrete samples were kept during 28 days in a climatic chamber at 25°C and HR  $\approx$  99%, ensuring the correct curing of the samples.

## Study scenarios

In order to evaluate the effectivity of the sensor system, the samples were conditioned under different aggressive conditions. According to this, the following scenarios were defined:

- Non-carbonated concrete in water saturated conditions (SAT): After concrete pouring, the samples were kept 48 days in climatic chamber at  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $\text{HR} \approx 99\%$ . Following, the samples were submerged in water.
- Non-carbonated concrete in atmospheric conditions (ATM): When the study in SAT conditions was finished, the samples were softly dried in an oven at  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  during 48 h. After this time, the samples were chilled at laboratory conditions during 48h, before to begin the tests.
- Carbonated concrete ( $\text{CO}_2$ ): Once the test in ATM conditions were performed, the half of the samples were introduced in carbonation chamber, during 60 days, with the purpose to ensure the carbonation of the sensor surroundings. Previously was evaluated the required time to get the complete carbonation of the samples.
- Chlorides presences ( $\text{Cl}^-$ ): Once the test in ATM conditions were performed, the half of the samples were submerged in NaCl dissolution 0.5 m (this concentration is similar to the seawater).
- In regard to the measurements sequence in each state, in SAT and ATM the measures were performed three consecutive days. In the carbonated and chlorides presences, the measures were made spaced in the time during a period of 130 days.

## Electrochemical Techniques used

Cyclic Voltammetry (CV) and Impedance Spectroscopy (EI) were used. These were applied by means of Autolab PGSTAT10 and the data were extracted with software Nova 1.11.

Both techniques were applied using 3 electrodes configuration. The working electrode was always the sensor. As counter-electrode was used a stainless steel (SS) sheet embedded in the samples (Figure 1), surface  $21\text{ cm}^2 \pm 1\text{ cm}^2$ . A Saturated Calomel Electrode (SCE) was used as reference electrode.

The CV was applied in the potential range required for each estimation model.

Regarding EI, was applied in the frequency range from 100000 Hz to 1000 Hz and the RMS of the potential signal was 10mV. With this technique was obtained the Ru (Martínez-Ibernón,2019). With this parameter was corrected the ohmic drop in the CV voltagrams (Martínez-Ibernón,2019).

### Data Analysis

Through the results obtained in the CV with the sensors of the system was created the matrix data to perform the Principal Components Analysis (PCA) (Alcañiz *et al*,2011). This statistical tool allows to reduce the number of independent variables in a vector space of two dimensions, losing the less information as is possible (Alcañiz *et al*,2011). The axis of this new space are named Principal Components (PC). This representation makes easier the interpretation of the data.

In the study, the PCA allowed to identify the concrete state.

This data processed protocol was applied by means of the toolbox for MATLAB (Bal-labio, 2015).

Once the state of the concrete was identified, the proper model is used to estimate the next parameters: oxygen permeability, percentage of humidity variation, concrete pH and chlorides concentrations. All of these parameters are correlated with the corrosion kinetics (Basheer,2001).

The simple models have been calibrated and validated in previous studies.

## **RESULTS**

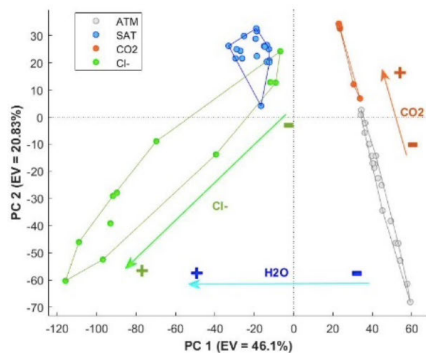
### PCA data analysis

In the Figure 2 is showed the scores graph of PCA for the first two PC.

In the axis X was represented the PC1 which explained the 46.1% of the data variance, and in the axis Y was represented the PC2 which explained the 20.83% of the data variance. The total of the explained variance was 66.93%, according to score data showed in other studies (Alcañiz *et al*,2011; Campos, 2013) the PCA model represented well the information provided for the different measurements.

The clusters in the PCA were grouped according to the concrete state (SAT, ATM, Cly CO<sub>2</sub>), the clusters were well differentiated, and we could define tendency according

to the concrete conditions. These tendencies were defined through the arrows  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$ .



- **Blue:** Saturated water conditions (SAT);
- **Grey:** Atmospheric conditions (ATM);
- **Green:** Submerged NaCl 0.5m dissolution conditions (Cl-);
- **Orange:** Carbonated concrete (CO2).

**Figure 2.** PCA analysis graph

After to identify the state of the concrete sample, were estimated the study parameters.

In the following points are showed the different simple models with an example of their effectivity.

Estimation model of oxygen permeability and variations in humidity availability

In Figure 3 is showed the simple models for the estimation of air permeability and humidity availability variation through the sensor 1.

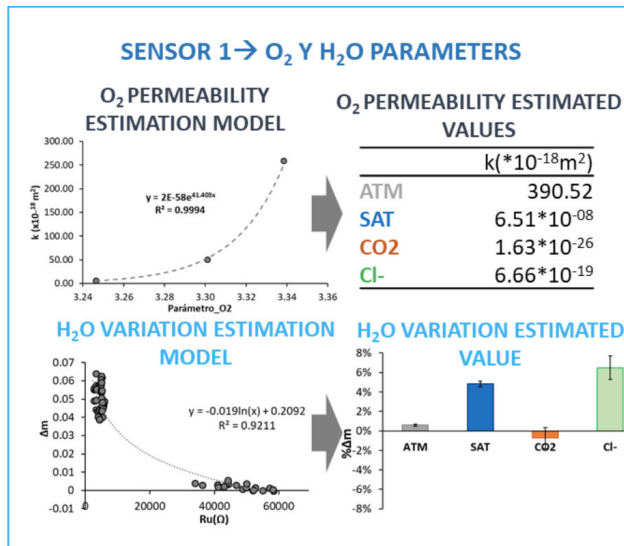
The estimation results are consistent with the state of the samples tested. The greatest air permeability was obtained in the atmospheric conditions (ATM) whereas the lower was in the case of carbonated concrete (CO2). This fact was explained through the obturation of the pores during the carbonation of the concrete, this difficult significantly the penetration and diffusion of fluids in the concrete matrix (Claisse *et al*, 1999).

In the liquid saturated states (SAT y Cl-), the permeability was quite similar in both, this permeability was limited by the capability of air dissolution at the pressure of concrete pore solution.

The results in the permeability model was coherent with the results of the humidity model. In this model, the highest positive increasement of water availability was produced in the saturated states (SAT and Cl-). In the Cl state is bigger than in the SAT

conditions, because the penetration of chlorides produces also an increasement in the simple weigh.

On the other hand, the huge decreasement took place in carbonation concrete conditions, as was mentioned before in this the penetration of fluids (liquids and gases) are inhibited, furthermore part of the humidity that could penetrate into of the concrete matrix was consumed in the carbonation reaction (Claisse *et al*,1999)..



**Figure 3.** Estimation model for air permeability and water availability variation.

Through the estimations of O<sub>2</sub> permeability and variations in humidity availability is possible to analyse the kinetic of corrosion processes and develop forecasted models which allow to early actuations in order to prevent the active corrosion of the rebars. This is a great advance in order to reduce the resources employed in the structures maintenance and repairation.

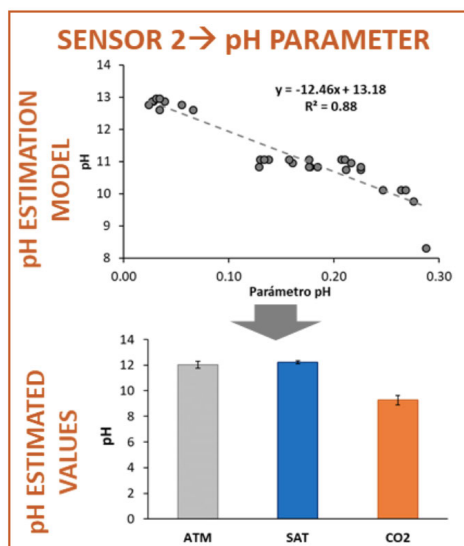
On the other hand, sharply increasement of the parameters could indicate the presence of cracks. The crack control is very important because this can indicate failures in the behaviour of the RCS and accelerate the degradation of them. Through the cracks penetrates in a massive way the aggressive agents such as the chlorides and the CO<sub>2</sub> accelerating the triggering of the active corrosion processes, therefore an alarm associated with a huge increasement of these parameters will help to reduce the damage in the structures saving the resources employed and increasing the sustainability in the life-cycle of the RCS.

### Estimation model of pH in the concrete

The second model developed by means of the response of sensor 2 allows estimate the pH of the concrete pore solution. It is important the measurement of this parameter, because in normal conditions the pH of the pore solution is basic ( $\text{pH} \approx 12.5$ ), this basicity propitiates the formation of rebar passive layer. When the acidification of the pore solution occurs ( $\text{pH} \leq 9$ ) this passive layer begins to be unstable and is destroyed, in this situation the active corrosion of the rebar is favoured.

The carbonation of the concrete, due to the reaction of the  $\text{CO}_2$  atmospheric with the calcium hydroxide of the pore solution, generates this acidification phenomenon (Claisse *et al*, 1999).

The result of the model in the different states (Figure 4) shows the capability of the sensor to identify this pH drop and estimate quite accurately the pH of the pore solution. In the graph is showed the typical deviation respect the real pH of the concrete measure by means of the measure in-situ leaching in small concrete cavities (Sagües, 1997).



**Figure 4.** pH estimation model

### Chlorides concentration estimation model

Other important aspect in the RCS durability preservation is the presences of chlorides in the pore solution. This fact, is one of the mainly causes of rebars despassivation. Furthermore, its reaction with the cementitious matrix produce the called

Friedel salts, which produces stress forces inside the matrix, this can produce the weakness of the concrete mechanical properties ( Zhang , 2020).

In the Figure 5 is showed the results of chlorides concentration estimation in three different dates for one sample. The results present a rising trend over the time. As is reasonable, as much time of the sample submerged in the dissolution with chlorides as much concentration of chlorides in its pore solution.

This model is very effective to forecast in which moment is going to exist in the surrounding of the rebar the critical chlorides concentration, this is the concentration from the rebars begins to despassivate.

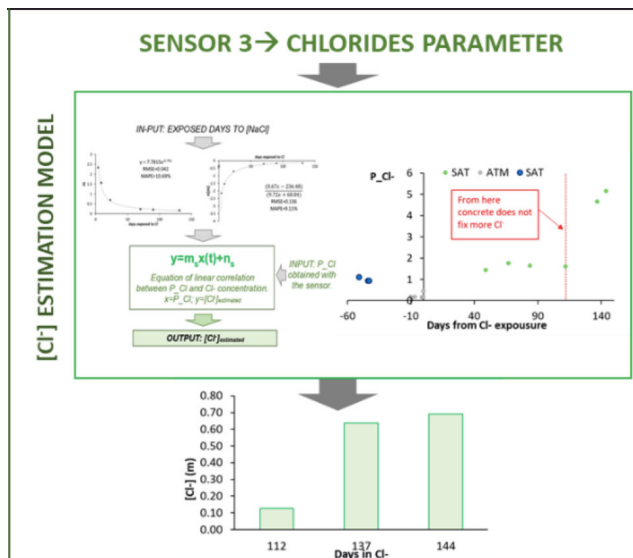


Figure 5. [Cl<sup>-</sup>] estimation model

### Smart monitoring system

Lastly, after to analyse the different estimation models, was proposed a smart work routine, in which the system have to be capable to evaluate the situation of the concrete and then use the properly model.

In the scheme of Figure 6, was depicted the proposal work routine. First the multisensor system through the PCA determines the state of the concrete, following is determined the parameter necessary to be controlled depending on the PCA results.

In this way, the energy consume by the system is reduced and also is improved its sustainability.

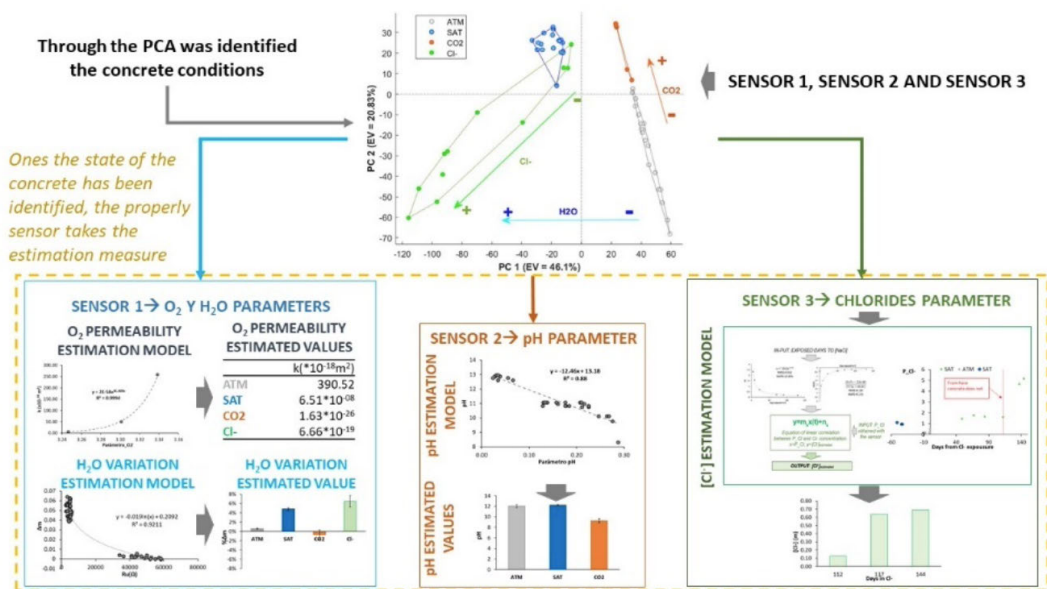


Figure 6. Scheme of proposal SMG

## CONCLUSION

The proposal sensor system is capable to identify the concrete state and also estimate the interest parameters correlated with the RCS durability (oxygen permeability, variation in humidity availability, pH of concrete pore solution and concentration of chlorides). These allow us to develop effective control and forecasted models which will alert of the possible damage at early ages, reducing the resources and the energy used in the maintenance and repair task, this reduction produces a decrease in the waste produced in the construction sector, making more sustainable the cycle-life of the RCS.

On the other hand, it will be important incorporating “intelligence” to the system, with the purpose to reduce the energy consumption until the minimum necessity, in this way, the functionality of the system is optimized both from an economic and environmental point of view.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express their gratitude to the Spanish Ministry of Science and Innovation for the pre-doctoral scholarship granted to Ana Martínez Ibernón (FPU16/00723). To the Universitat Politècnica de València for the financial support in

the project “Ayudas a Primeros Proyectos de Investigación (PAID-06-18): Lengua Electrónica Voltamétrica para el control de durabilidad en hormigones, SP20180245”.

## REFERENCES

- Alcañiz Fillol M.** Diseño de un sistema de lengua electrónica basado en técnicas electroquímicas voltamétricas y su aplicación en el ámbito agroalimentario. 2011;295. Available from: <http://tdx.cesca.cat/handle/10803/34322>
- Ballabio D.** Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems A MATLAB toolbox for Principal Component Analysis and unsupervised exploration of data structure. Chemom Intell Lab Syst [Internet]. 2015;149:1–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemolab.2015.10.003>
- Basheer L, Kropp J, Cleland DJ.** Assessment of the durability of concrete from its permeation properties : a review. 2001;93–103.
- Campos I.** Sensores electroquímicos tipo lengua electrónica voltamétrica aplicados al control medioambiental y a la industria alimentaria. Universitat Politècnica de València; 2013.
- Claisse PA, El-Sayad HI, Shaaban IG.** Permeability and Pore Volume of Carbonated Concrete. Mater J. 1999;96(3):378–81.
- Duffó GS, Farina SB.** Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures. Constr Build Mater [Internet]. 2009;23(8):2746–51. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuild-mat.2009.04.001>
- Gandía-Romero JM, Bataller R, Monzón P, Campos I, García-Breijo E, Valcuende M, et al.** Characterization of embeddable potentiometric thick-film sensors for monitoring chloride penetration in concrete. Sensors Actuators, B Chem. 2016;222:407–18.
- Gandía Romero JM.** Sensores electroquímicos aplicados al estudio de la corrosión en estructuras de hormigón armado [Internet]. [Valencia (Spain)]: Universitat Politècnica de València; 2014 [cited 2018 Mar 26]. Available from: <https://riunet.upv.es/handle/10251/48516>
- Global Energy Review 2020.** Glob Energy Rev 2020. 2020;

- Martínez-Ibernón A, Ramón JE, Gandía-Romero JM, Gasch I, Valcuende M, Alcañiz M, et al.** Electrochimica Acta Characterization of electrochemical systems using potential step voltammetry . Part II : Modeling of reversible systems. 2019;328. Naik TR. Sustainability of Concrete Construction. Pract Period Struct Des Constr. 2008;13(2):98–103. Ramón Zamora JE. Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado . Fundamentos , Metodología y Aplicaciones. PhD Thesis, Univ Politècnica València, València, Spain,. 2018;
- Sagües AA, Moreno EI, Andrade C.** Evolution of pH during in-situ leaching in small concrete cavities. Cem Concr Res. 1997;27(11):1747–59.
- Tutti K.** Corrosion of steel in concrete. Stokholm: Swedish Cement and Concrete Institute; 1982.
- Zhang Z, Hu J, Ma Y, Wang Y, Huang H, Zhang Z, et al.** A state-of-the-art review on Ag/AgCl ion-selective electrode used for non-destructive chloride detection in concrete. Compos Part B Eng [Internet]. 2020;200(August):108289. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108289>

# CERRAMIENTOS DE ALTA EFICIENCIA ENERGÉTICA. CASO DE ESTUDIO SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN: THERMA-WALL. PARTE I

Graziella Bernardo<sup>1</sup>, Luis Manuel Palmero Iglesias<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Università della Basilicata, Italy, [graziella.bernardo@unibas.it](mailto:graziella.bernardo@unibas.it)

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de València, Spain, [lpalmero@csa.upv.es](mailto:lpalmero@csa.upv.es)

## ABSTRACT

Desde hace ya muchos años, la tecnología de la construcción no ha avanzado tanto como las exigencias de su propio mercado. Debido a estas exigencias actuales, tanto normativas como sociales, la forma de construir de antaño no es válida hoy en día. Por ello, es necesario un estudio y una puesta en valor de otros productos que puedan ser utilizados junto a los materiales más utilizados en la construcción tradicional, referida por ejemplo a la cerámica tan frecuentemente utilizada tanto en la tabiquería interior como en los propios cerramientos. Estos productos van a producir diferentes alternativas para favorecer diferentes aspectos, hoy en día muy importantes, como son, por ejemplo, la industrialización de una parte del sector, así como la especialización del mismo. También es cierto que en la actualidad y a partir de la pandemia se debe de pensar en otras alternativas que puedan generar la conversión de los espacios y garantizar cierta privacidad, la tabiquería en seco, ya sea móvil, o estática presenta para este caso mejoras substanciales a las soluciones tradicionales masivas y generadoras de residuos y por lo tanto carentes de sostenibilidad. Para estos casos los materiales de composición deben ser acordes con unos criterios de sostenibilidad y ahorro energético fundamentales, no podemos pensar en proyectar ni llevar a cabo la práctica constructiva sin estos conceptos por lo que el presente trabajo como segunda parte pretende dar a conocer, junto al primero, con más detalle estos materiales.

**Keywords:** Eficiencia, construcción, tecnología, sostenibilidad

## INTRODUCTION

A partir del momento en que pared y estructura se independizan definitivamente, se impone la necesidad de establecer una coordinación mutua a la vez que una libertad de diseño y construcción notables. No obstante, ambos elementos participan en el propósito de superar los logros del pasado. Asimismo, los dos casos comparten las técnicas industriales con una línea de producción que favorece la producción de los

materiales. La industria también aporta sus conocimientos en el terreno del montaje de estos elementos prefabricados, lo que implica que las paredes respondan a unos patrones de proporción a base de módulos preestablecidos, a diferencia de cómo como ocurría antaño con material confeccionado de forma artesanal, aquí, la pared responde a unas dimensiones determinadas, pero, por otra parte, fácilmente adaptables a la necesidad del proyecto.

La denominada tabiquería seca es un sistema constructivo que utiliza placa de yeso laminado en la creación de tabiques. El adjetivo “seca” viene del producto no requiere de argamasa, cemento u otras pastas para su instalación, por lo que se prescinde del tiempo de secado. En España representa en la actualidad más del 60 % de las construcciones de primera utilización evitando de este modo el uso del sistema tradicional, es decir, los típicos tabiques que todos conocemos en sus respectivos espesores. Desde hace mucho tiempo, se ha venido utilizando el ladrillo como método de construcción tradicional ya fuera como divisiones interiores que como cerramientos. Hasta hace poco tiempo, no se conocían alternativas existentes, pero con la llegada y la evolución de las placas de cartón yeso, esta situación ha cambiado sustancialmente. El uso de tabiquería seca empezó en sus inicios a popularizarse en España, principalmente en la ejecución de obras comerciales e industriales. Hoy en día, el uso de la tabiquería seca es generalizado para viviendas, ya sean de nueva construcción, reformas o rehabilitaciones, entre otras cuestiones por ser más limpia y presentar un ahorro considerable en cuanto a los tiempos de ejecución. Además, en el caso de rehabilitar la vivienda, genera una gestión más eficaz de los residuos, menor gasto energético y la posibilidad de reciclado del material, consiguiendo acciones más sostenibles en la construcción.

### El yeso un material versátil

El yeso es uno de los materiales más utilizados en el mundo de la construcción. De hecho, es considerado uno de los conglomerados para construcción más antiguos de la Historia. Sin duda, el éxito del yeso a lo largo del tiempo ha tenido mucho que ver con su facilidad de obtención y sus múltiples ventajas, que contribuyen a mejorar la habitabilidad de todo tipo de edificaciones.

Vitruvio ya nos habla en su famoso legado de los Diez Libros de Arquitectura sobre la cal en el capítulo 5 de su libro II. No menciona en ningún momento los hornos de cal, igual que tampoco lo hace con los de ladrillo, pudiera ser por desconocimiento, o porque se ocupase de ellos en otro libro perdido. Esto bien pudiera ser cierto, pues en todo momento Vitruvio no sigue en su discurso un orden lógico, sino que salta

con frecuencia de un tema a otro, para volver a retomarlo más adelante. (La obra de Vitruvio es una obra con muchos elementos descriptivos y pocos ordenados, como es este caso. En un principio nos menciona dos clases de piedra para obtener cal: la porosa y la dura. En este caso no sabemos a qué tipo de piedra porosa se refiere. Pudiera ser piedra caliza formada por pequeñas conchas de molusco, o tal vez se refiera en realidad al aljez.

El aljez no es una piedra de la que se obtiene cal, sino yeso. Es un sulfato cálcico dihidratado ( $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) de donde se obtiene el yeso tras un proceso parecido al de la cal, este último es un óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ).

Posiblemente Vitruvio no fuera capaz de apreciar que el aljez, en realidad no es una roca caliza (aunque se parecen mucho), por lo que no haría distinción entre unas y otras. Además, afirma que la cal procedente de esta piedra porosa es muy apta para los enlucidos, como sabemos en la actualidad, es de lo que se hacen la inmensa mayoría de los mismos.

En la civilización griega, el yeso fue muy utilizado como material de revestimiento, en estucos y guarnecidos. De esta época es la referencia escrita sobre el gypsos, palabra griega que significa tierra más agua, y que se utilizó para referirse al yeso y a la cal. Los romanos utilizaron el yeso en aquellas provincias en las que abundaba, Su aparición como hallazgo en Pompeya en importantes decoraciones y revestimientos, dan muestra de ello, así como almacenes de yeso de Grecia, lo que hoy indica la existencia de un comercio a larga distancia, presuponiendo una alta valoración del producto. En España, durante los siglos XIII al XV, se distinguen focos de gran interés, tanto en el reino musulmán nazarí de Granada como en la zona cristiana en Aragón, Toledo y Sevilla (Villanueva, 1996). En España se utilizó de manera general ya que el país presenta una gran abundancia de terreno yesífero, cerca del 60% del total de la superficie, con una materia prima de excelente calidad (80-85% de pureza). La tradición medieval de las yeserías continuó durante la primera mitad del siglo XVI, con motivos decorativos renacentistas, en el denominado estilo Plateresco<sup>1</sup>. Durante el renacimiento y el barroco se utiliza profusamente el yeso en la decoración de interiores. Junto a la yesería con motivos clásicos aparece el estuco, que proporciona superficies pulidas a imitación del mármol. También aparece la escayola, utilizada en planchas para realizar falsos techos. Se trata de un producto fabricado con más esmero a partir de piedra de yeso de gran pureza, deshidratada parcialmente a baja temperatura y molido con gran finura. Se utiliza en trabajos decorativos, donde es preciso reproducir molduras u otros motivos ornamentales con exactitud y precisión.

**1.-El Plateresco**, también llamado gótico plateresco, fue una corriente artística especialmente arquitectónica desarrollada por la monarquía española en la península, así como en territorios imperiales de América, que apareció entre el gótico tardío y el Renacimiento, a finales del siglo XV, extendiéndose durante los dos siglos siguientes, es reconocido como estilo genuinamente español.

En el siglo XVII los problemas económicos que sufre España dificultan la construcción de bóvedas y cúpulas de cantería. Se recurre a realizarlas con albañilería, en fábricas de rosca de ladrillo o tabicadas, en ambos casos mediante la utilización del yeso por sus propiedades físico-químicas en el proceso de su materialización. Asimismo, hay que citar el empleo del yeso junto a fibras vegetales en producto denominado staff, muy empleado en Francia para la decoración con su máxima expresión en el periodo Rococó, que perdura en elementos prefabricados, en trabajos similares a los realizados con escayola.

Será a partir del siglo XVIII cuando se inicia a conocer el yeso de manera científica, En 1765 Lavoisier<sup>2</sup> redactó dos informes sobre el yeso mineral empleado en París para blanquear las casas y observó que la única diferencia entre el yeso cristalizado y el yeso en polvo era el agua de hidratación y que se podían transformar el uno en el otro simplemente ganando o perdiendo agua. Este estudio científico del famoso químico y biólogo sobre la preparación del yeso se fue completando con aportaciones de gran interés, así ya en el siglo XIX, Van t' Hoff y Le Chatelier dieron una explicación científica a la deshidratación, iniciando una serie ininterrumpida de investigaciones sobre este material.

En esa época comienza el proceso de industrialización que afectará en primer lugar a los materiales y después a la construcción. Es en este tiempo donde los nuevos los materiales acero y cemento de forma destacada tendrán un mayor protagonismo e importancia, ya que van a significar un nuevo concepto a la estructura de los edificios que se resume en un esqueleto resistente independiente de los cerramientos. Un sistema que afectará no solo a otros materiales, sino también a las herramientas y al propio sistema constructivo, desde entonces en continua evolución.

En lo referente a los materiales conglomerantes tradicionales, se produce una evolución diferente. Se industrializa la fabricación del yeso, en un proceso que termina con la introducción de innumerables tipos de hornos, con el objetivo de conseguir un sistema racional de calcinación. Igualmente se produce la adición de los yesos en fábrica lo que significa y da mejores resultados de su adición en la propia obra consiguiendo de este modo una racionalización del uso y proceso.

**2.- Antoine-Laurent de Lavoisier** (1743-1794) fue un químico, biólogo y economista francés. Considerado como el “padre de la química moderna”, trabajo en diversas disciplinas con grandes descubrimientos de índole e importancia científica que marcaron fundamentos útiles en el campo científico y de investigación actual.

A principios del siglo XX aparece en Estados Unidos la placa de yeso laminado, que consiste en un tablero de dos cartones con alma de yeso, inventado con el fin de sustituir a los tableros de madera y aumentar la resistencia al fuego en caso de incendio. Aparece, por tanto, en un contexto de tabiques de carpintería muy arraigado en Estados Unidos y otros países del norte de Europa, pero que en su traslado a los países mediterráneos, de tradición constructiva en el área de la albañilería, produce un efecto importante, tendente a la industrialización del sistema constructivo.

### Materiales para una construcción sostenible

Si atendemos a lo especificado en la Guía de Materiales para una construcción sostenible, iniciativa y publicación colegial (Colegio Oficial de Aparejadores Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia), encontramos una serie de productos muy interesantes para el estudio que nos ocupa y que en nuestro caso todo se concentra en un sistema para tabiques que utiliza placas de yeso laminado (PYL) atornilladas sobre una estructura metálica de acero galvanizado. El yeso pasa por unos estados plásticos de consistencia variable antes de terminar su proceso de fraguado, en los cuales se le puede dar forma a voluntad. Este carácter formáceo hace posible que se adapte a cualquier tipo de molde, que reproduce de forma precisa, debido a la conjunción de otra propiedad, la expansión de fraguado. Esta propiedad hace del yeso un material idóneo para ser utilizado en derivados prefabricados, tales como placas, paneles suelo-techo, molduras, cornisas, bovedillas para forjados.

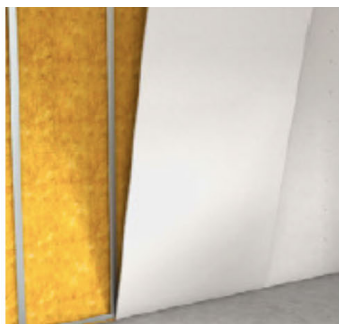
Esto es la idea principal, pero a partir de aquí entran en juego muchos factores, desde la propia industrialización y la especialización de la mano de obra, cuestiones que se alejan de la filosofía de la construcción tradicional en cuanto a su idea primigenia, hasta la composición de los mismos, es decir los materiales de constitución que son aliados del yeso. Y este es, entre otros uno de los cometidos de este trabajo profundizar en las condiciones del producto y del material, defendiendo siempre los criterios desde el punto de vista sostenible y medio ambiental. Estando en este punto es justo decir que la placa de yeso laminado es uno de los pocos materiales que se pueden reciclar durante su fase de instalación de obra, incluso permite condiciones en cuanto al reuso, por eso, debemos aprovechar esta especial circunstancia para contribuir a reducir lo máximo posible el impacto en el entorno y el derroche de

recursos para su fabricación. El cumplimiento de las normativas, debido al abuso por parte del sector en no seguir políticas medioambientales, son cada vez más estrictas respecto a la gestión de los RCD, imponiendo tasas de recuperación de los materiales cada vez más elevadas y limitando su eliminación a través de los tradicionales vertederos.

La construcción camina hacia la sostenibilidad, y esto es algo a lo que se puede contribuir con servicios como el del reciclaje de placa de yeso laminado. Es necesario señalar que, para formar parte de este proceso de forma oficial, es frecuente que las administraciones pertinentes exijan a las empresas figurar en un registro específico, algo relativamente muy sencillo de gestionar en pos de una sana política de gestión medioambiental.

Una alternativa económica y certificada. El reciclaje puede suponer una solución mucho más económica de gestión de los residuos de yeso, por delante de las opciones de eliminación tradicionales. Además, con el reciclaje se asegura el seguimiento de esos residuos y la garantía de que son gestionados adecuadamente, además de obtener algunos certificados muy interesantes en cuanto a construcción sostenible.

El fomento de la economía circular es clave para lograr un futuro más sostenible, y los procesos de reciclado contribuyen directamente a ello. Apostar por el reciclaje de placa de yeso (Fig. 1), nos hace partícipes de ese proceso y nos convierte en agentes de cambio comprometidos con el medio ambiente, lo que también mejora la imagen de las empresas.



**Figura 1.** Panelado de la pared sobre el aislante **Figura 2.** Proyección mediante celulosa

#### Aplacados de yeso como alternativa al sistema tradicional

Como arriba se mencionaba, el yeso puede ser compatible con algunos productos del mercado que combinados pueden dar magníficos resultados, por ejemplo, la fab-

ricación de paneles compuestos por yeso y fibra de celulosa, obtenida del reciclado del papel, puede ser una opción muy interesante en este campo.

Una mezcla homogénea de estas dos materias primas naturales, con la adición de agua y sin ningún aditivo aglutinante, sometida a prensa bajo alta compresión puede dar lugar a crear un panel de excelente estabilidad y olor neutro, que, tras un secado, puede despiezarse en cortes obteniendo diferentes formatos de aplicación. Bajo unos severos controles de calidad representa un proceso de producción innovador y ecológico. Igualmente, la celulosa va a presentar más aplicaciones porque su uso como material de aislamiento proyectado, (fig.2), bajo los mismos criterios arriba explicados va a significar una solución pertinente y ecológica. Las aplicaciones son múltiples en edificación, ya sea desde un uso en sótanos o hasta en el tejado, con soluciones en viviendas nuevas como en trabajos de rehabilitación.

Como se puede comprobar el sistema presenta una ejecución con muchas ventajas, ya que el yeso y en forma de aplacado reúne las condiciones entre otras de buen aislante, buena compatibilidad con otros materiales resulta fácil de ejecutar y cumple parámetros medioambientales.

Asimismo, el panel de exteriores Fermacell3 panel compuesto de cemento armado con fibras de vidrio, (sustituyendo al yeso por razones obvias en exterior), supone otra solución que, bajo los mismos parámetros que el anterior responde a una serie de características y requerimientos físico-químicos apropiados. Fermacell alcanza su acreditada calidad mediante un concepto general convincente que empieza con su elaboración. Los paneles, compuestos por yeso y fibra de celulosa, obtenida del reciclaje de papel, destaca por su alta resistencia a la flexotracción y compresión, gracias al armado de fibras de vidrio alcali-resistentes con autorización oficial para su utilización como material constructivo. Asimismo, presenta composición puramente mineral sin ningún componente combustible (clasificación A1 de “materiales de construcción incombustibles” según la norma DIN 4102 – equivalente a M0 en España). Lo que le hace muy resistente al fuego. Además, como el resto de los materiales con esta composición los ensayos de varios Institutos certifican la excelente capacidad de aislamiento acústico de los paneles exteriores Fermacell. El panel de exteriores Fermacell es apto para su empleo como revestimiento de fachada, con o sin cámara de aire, garantizando una protección duradera a la intemperie (Autorización Oficial Z-9.1-187 del Instituto Alemán para Técnicas de la Construcción concedida a los paneles Fermacell).

En el caso de los revestimientos de techo el uso de estos aplacados resuelven un problema de acabado muy importante ya que el trabajo manual de enlucido siempre ha sido un trabajo de cierta dificultad que era resuelto por la tradición de los yesaires quienes de forma magistral, daban terminaciones dignas y de cierta calidad, pero los nuevos elementos de iluminación, la ganancia de alturas, la exigencia de planeidad, la ausencia de imperfecciones antes luces indirectas por un techo maestreado, ha hecho que los aplacados de techo sean en la actualidad un producto de cierta necesidad, ya sea esta visual que estética en cuanto a su acabado. Actualmente se utiliza el sistema de falsos techos situados a una cierta distancia del forjado mediante piezas prefabricadas, generalmente de aluminio, acero, PVC o escayola, soportadas por fijaciones metálicas o caña y estopa.

**3.- Fermacell** fue la primera placa de fibra yeso en el mercado. Desde hace más de 30 años la marca representa la construcción seca con un producto testado y certificado para la bioconstrucción.

El espacio comprendido sirve para el paso de instalaciones. Thermal-wall también es un gran producto para ser utilizado como revestimiento de techos, debido a sus excelentes características. Los techos Thermal-wall nos brindan una superficie absolutamente lisa y sin ningún tipo de irregularidades que puede ser pintada y acabada como cualquier techo tradicional y que puede ser perforado para situar elementos colgantes que no hayan sido tenidos en cuenta previamente como para integrar elementos de iluminación no previstos inicialmente.

Todo esto sin la necesidad de dejar ningún tipo de distancia entre el forjado y el Thermal-wall ya que se puede disponer pegado al forjado y las instalaciones se pueden realizar de igual forma que en la tabiquería, es decir, pasan por el interior del material mediante rozas. De esta forma se gana mucha altura libre en cada vivienda, reduciendo sensiblemente los costes de producción.

### Espacios Flexibles y modulación espacial

En la actualidad y después de la situación relativa a la pandemia que hemos sufrido aparece una tendencia, (no novedosa), para crear espacios determinados por la distribución del proyecto puedan ser transformados, puedan ser capaces de adquirir este concepto de flexibilidad que nos ocupa y que son soluciones proyectuales que aportan adaptabilidad y versatilidad de sus elementos secundarios (particiones, mobiliario, etc.), que bajo el concepto de espacio transformable o de grandes presta-

ciones consiguen diversidad de espacios, capacidad de adaptación a distintos requerimientos, de uso y función.

Actualmente la arquitectura ha incorporado el concepto de “flexibilidad”, con el cual, los usos asignados a cada espacio no permanecen estáticos, sino que posibilitan su

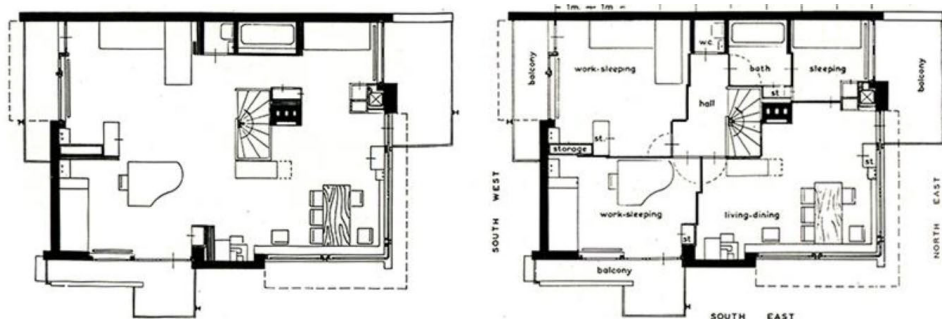
adaptación a distintas actividades o funciones. Así, los proyectos en la arquitectura comercial, industrial, hospitalaria, educacional, propiedad horizontal, y de vivienda individual y colectiva incorporan este concepto en la organización de sus espacios.

La vivienda tradicional, está proyectada para satisfacer las necesidades de las denominadas “familias tipo”, pero los cambios de hábitos, costumbres, nuevas formas de convivencia, estructura familiar y por último la pandemia que ha puesto en evidencia la falta de privacidad y funcionalidad en las viviendas cuando por fuerza todos deben de compartir el mismo espacio han obligado a replantear esta organización.

La flexibilidad se presenta como una alternativa posible de ser aplicada en la vivienda contemporánea, pero esto requiere de un diseño arquitectónico acorde que parta de una planta libre y de espacios modulados donde quede definida la envolvente (paredes y cerramientos perimetrales), el área de servicios (baño, cocina, lavadero) y la disposición de los paneles a partir de tener en cuenta las distintas posibilidades que puedan plantearse. También es muy importante la disposición de los circuitos eléctricos y el tipo de artefactos a utilizar. Lógicamente los núcleos húmedos del alojamiento, aquéllos que albergan la mayor carga técnica y de coste son los más condicionantes y restrictivos a la hora de originar propuestas de absoluta transformación. Es pues, la incorporación de la variable tiempo a los elementos tridimensionales del alojamiento, o bien la versatilidad de los elementos fundamentales. Los sistemas tradicionales empleados en la construcción no se ajustan con la idea de modificar o adaptar a un espacio, por el contrario, produce particiones estrictas y estáticas.

Sin duda, el sistema de aplacados permite construir o reformar cualquier ambiente reduciendo costos y tiempo de obra. Las paredes de Thermal-wall ofrecen múltiples ventajas sobre la albañilería tradicional, (arriba mencionadas) ya que son fáciles de ejecutar, rápido, limpio y sumamente práctico y con un costo final muy inferior a la construcción tradicional. El ganar en flexibilidad permitirá cambios en la distribución interna pudiendo aumentar o disminuir el número de habitaciones sin tener que iniciar una obra tradicional con los inconvenientes que ello acarrea, y una simplificación en el mantenimiento de la propiedad. Además, en la actualidad estos aplacados constituidos en tabiques pueden ser móviles, con diferentes desplazamientos incluidos

giros y abatimientos, lo cual va a permitir mayores y más eficaces soluciones. Supone además un nuevo planteamiento arquitectónico desde la base proyectual ya que según vaya cambiando la unidad familiar con el paso del tiempo la vivienda también podrá ser cambiada ajustándose a las necesidades de sus propietarios.



**Figura 3.** Gerrit Rietveld, Casa Schröder-Schröder, Utrecht, 1924, con la disposición abierta y cerrada de la planta superior con el concepto de flexibilidad arriba comentado.

## CONCLUSION

En la actualidad somos conscientes que la construcción tradicional debe de mejorar en cuanto a eficacia, la sostenibilidad, el ahorro en la ejecución (costos-tiempos), y mirar hacia alternativas y estrategias de innovación. Todo ello asumiendo la cuestión tecnológica que, pese a no haber avanzado lo suficiente debido a la consolidación de los sistemas tradicionales, sigue un proceso de avance muy positivo que se aprecia en muchos sistemas constructivos. La posibilidad de sustituir el tabique típico de distribución en viviendas, trasdosados, y cerramientos por emplacados como el estudiado, no hace más que constatar este cambio en donde las empresas están, (por fortuna), considerando los materiales de forma separada, con un estudio pormenorizado de cada uno de los materiales de constitución pertenecientes a un sistema determinado, obteniendo los beneficios de cada uno de ellos dentro del sistema general. Así los aplacados de yeso y fibras, el poliestireno, los bloques de hormigón celular de la conocida marca Ytong, permiten ampliar el mercado y las soluciones que por separado cada uno de los sistemas aporta. Todos estos sistemas presentan alternativas interesantes en un contexto definido y diferente, pero sin duda ÚTIL y eficaz, dando SEGÚN se constata en la práctica constructiva actual una serie de ventajas en cuanto a la realización de fábricas de ladrillo, con un enfoque a favor de la economía, la minimización de los residuos y la sostenibilidad sin olvidar la tecnología.

## **REFERENCES**

**AAVV, Código Técnico de la Edificación**,(2009) Seguridad en Caso de Incendio, Boletín Oficial del Estado, Madrid.

**AAVV, Código Técnico de la Edificación**, (2010) Seguridad de Utilización y Accesibilidad, Boletín Oficial del Estado, Madrid. AAVV, Código Técnico de la Edificación, (2009) Protección Frente al Ruido, Boletín Oficial del Estado, Madrid.

**AAVV, Código Técnico de la Edificación**,(2009) Ahorro de Energía, Boletín Oficial del Estado, Madrid. AAVV, Código Técnico de la Edificación, (2006) Salubridad, Boletín Oficial del Estado, Madrid.

**AAVV**, Sistemas Pladur, catálogo de detalles técnicos, Cd de Yesos Ibéricos, grupo Uralita.



# CERRAMIENTOS DE ALTA EFICIENCIA ENERGÉTICA. CASO DE ESTUDIO SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN: THERMA-WALL. PARTE II

Graziella Bernardo<sup>1</sup>, Luis Manuel Palmero Iglesias<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Università della Basilicata, Italy, [graziella.bernardo@unibas.it](mailto:graziella.bernardo@unibas.it)

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de València, Spain, [lpalmero@csa.upv.es](mailto:lpalmero@csa.upv.es)

## ABSTRACT

Desde hace ya muchos años, la tecnología de la construcción no ha avanzado tanto como las exigencias de su propio mercado. Debido a estas exigencias actuales, tanto normativas como sociales, la forma de construir de antaño no es válida hoy en día. Por ello, es necesario un estudio y una puesta en valor de otros productos que puedan ser utilizados junto a los materiales más utilizados en la construcción tradicional, como por ejemplo la cerámica tan frecuentemente utilizada tanto en la tabiquería interior como en los propios cerramientos. Estos nuevos productos pueden convivir, sin necesariamente sustituir a los anteriores, pero dada su demostrada eficiencia energética, al mismo tiempo que su compatibilidad con los sistemas constructivos tradicionales, adquirirán un papel determinante en el mercado actual. Este sistema desde hace años en fase de cierta experimentación ha dado muy buenos resultados y la tabiquería en seco ya representa un porcentaje muy alto en la construcción actual, no obstante, el tiempo será el que decida sobre qué alternativas resultan más favorables y adecuadas.

**Keywords:** Eficiencia, construcción, tecnología, sostenibilidad

## INTRODUCTION

Sin duda alguna, la construcción ha cambiado de forma imponente en los ÚLTIMOS años, manifestándose con cambios significativos en el modo de gestión, que incorporan calidad, seguridad, más información y otras disciplinas de gestión, pero en cuanto a tecnología e industrialización todavía queda mucho camino por recorrer.

El sector de la construcción residencial debe invertir más en innovación e investigación, porque lleva demasiado tiempo cometiendo los mismos errores y trabajando de una forma absolutamente artesanal.

¿Y por dónde va a ir evolucionando el sector para transformarse en un sector competitivo? En la actualidad, el sector debe ir evolucionando básicamente en estas di-

recciones: la consecución de mayores niveles de sostenibilidad en todo el ciclo de vida de la vivienda; el diseño de edificios 100% accesibles; y sobre todo, la industrialización del sector.

Los conocimientos sobre construcción se siguen adquiriendo principalmente por medio de un sistema de aprendizaje informal. Sin embargo, esta formación tiene sus limitaciones (en particular reduce las oportunidades de aprendizaje, pues se basa en el aprendizaje práctico), por tanto, la producción en serie e industrialización adquiere una importancia todavía mayor. En estos últimos años, se ha construido de forma desmedida, provocando una repercusión de la construcción masiva de viviendas en la expansión de las ciudades y por lo tanto el elevado consumo energético que esto requiere, además de la construcción de edificaciones que, al no responder adecuadamente a las condiciones del lugar, los usuarios terminan introduciendo sistemas artificiales de calefacción y refrigeración que funcionan con energía eléctrica o gas lo que eleva los consecuentes consumos energéticos y genera una serie de inconvenientes relacionados con la contaminación del medio ambiente. Añadir a todo esto la conversión de antiguas viviendas temporales en permanentes desde años recientes en zonas metropolitanas y en las zonas de costa.

De estos aspectos surge la idea que en la actualidad la rehabilitación, remodelación, renovación y reacondicionamiento de edificaciones ocupa un lugar tan significativo en el sector de la construcción, cuestiones que se han convertido en una necesidad real desde la perspectiva que nos permite aprovechar lo que tenemos y disminuir el desmesurado gasto energético.

En este artículo se plantea una alternativa a los sistemas utilizados y más comercializados, a un precio competitivo y que REÚNE todos los requisitos de eficiencia energética y confort para competir con ellos. Pese al avance de la tecnología aplicada en los ÚLTIMOS años, los métodos utilizados en el sector siguen pautas tradicionales, situación que nos lleva a plantear la necesidad de cambiar la forma de construir para adaptarla a estos nuevos productos surgidos y así aprovechar todas sus ventajas: abaratar costes, acortar plazos y mejorar características funcionales y medioambientales. Con este objetivo surge la idea de plantear un sistema constructivo alternativo al tradicional.

### Consideración preliminar

El presente artículo no pretende dar una solución constructiva moderna única que sustituya al método tradicional aplicable en todo caso, sino que pretende plantear

un sistema constructivo alternativo al existente en el mercado actual. En este proceso no sólo se tiene en cuenta el coste y el plazo de construcción sino también conceptos no tan fácilmente cuantificables pero que no por ello tienen que dejar de tenerse en cuenta a la hora de elegir entre uno u otro proceso constructivo; un buen ejemplo de esto son aspectos relacionados con el medio ambiente, las molestias a los vecinos que ocasiona una obra, etc.

### Descripción del sistema thermal-wall

Una vez que conocemos los materiales más utilizados de forma tradicional es decir principalmente la tabiquería cerámica, a continuación se pretende realizar una completa descripción de este sistema alternativo denominado Thermal-wall.

Hoy en día, no se tiene conciencia que, por ejemplo, nuestros edificios usan más energía que los automóviles. Calefacción, aire acondicionado, la iluminación y el uso de electricidad consumen ingentes cantidades de energía.

El método que se indica en este trabajo es una nueva forma de combinar los sistemas constructivos que han existido en el mercado durante muchos años con un ahorro de tiempo, (relacionado con la mano de obra), así como de los materiales, con la idea de trabajar la construcción de forma eficiente y sostenible. Asimismo, podríamos afirmar que los edificios construidos con esta tecnología aumentan sensiblemente los niveles de confort general.

### Características y prestaciones

La estructura del Thermal-wall se concreta en un tabique compuesto por placas de poliestireno expandido, sin función estructural, colocados uno junto a otros y sobre otros, ordenadamente y machihembrados, pudiendo utilizar para su unión un mortero Eco-revoque. Estos tabiques se pueden disponer en la obra tanto como elementos de separación entre espacios interiores, como revestimiento exterior de cierre, es decir, como un trasdosado.

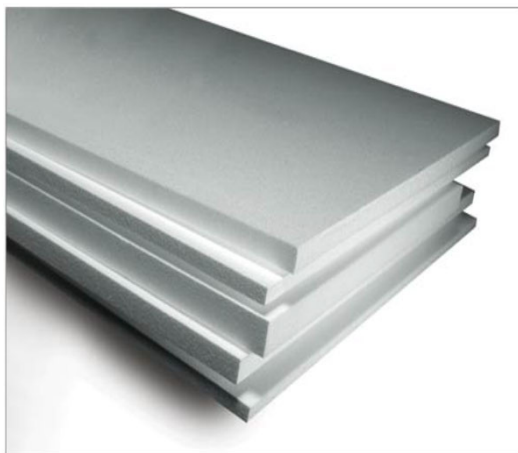
Además de esto, también pueden ejecutarse como revestimiento de techos mejorando el confort higrotérmico además de tener la posibilidad de ganar algunos cm de altura libre por planta. Incluso es posible utilizarlo en obra nueva, utilizando un producto en la cara exterior del muro llamado Fermacell, detallado en la Parte II como continuación de este artículo.

## Materiales de constitución

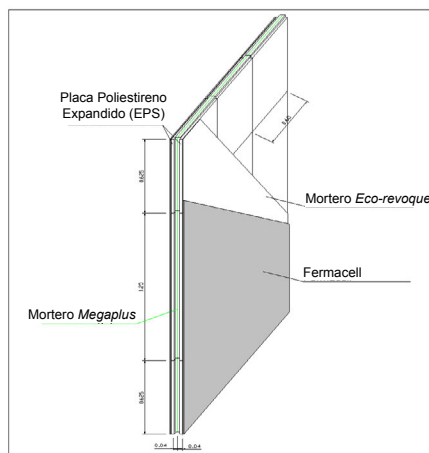
### Poliestireno Expandido

El poliestireno expandido (EPS) es un material plástico espumado, derivado del poliestireno. En el sector de la construcción, su uso es muy frecuente y tanto en la edificación como en las obras de ingeniería civil nos encontramos con numerosas aplicaciones del Poliestireno Expandido – EPS. Placas y paneles de aislamiento termoacústico, casetones y bovedillas para forjados, moldes de encofrado, juntas de dilatación, elementos decorativos interiores, bloques de EPS para dotar ligereza a terraplenes de carreteras, pantalanés flotantes, islas artificiales...

Esta extensa presencia se debe a las extraordinarias cualidades y propiedades de este material entre las que destacan su elevada capacidad de aislamiento térmico, su ligereza, sus propiedades de resistencia mecánica, su adecuado comportamiento frente al agua y resistencia a la difusión del vapor de agua y, en comparación con otros materiales, su versatilidad en forma y prestaciones que se concretan en una amplia gama. Además es un material que lleva implícito un bajo consumo de recursos materiales y energéticos.



**Figura 1.** Placas de poliestireno



**Figura 2.** Placas sistema Therma-wall

Este material presenta una relación de propiedades físicas que lo hacen muy competitivo como son: una alta resistencia mecánica, ya que la densidad del material guarda una estrecha correlación con las propiedades de resistencia mecánica. (Tensión de compresión ( $\sigma_{10}$ ) –UNE-EN-286). Esta propiedad se requiere en los productos de EPS sometidos a carga, como suelos, cubiertas, aislamiento perimetral de muros, etc. En la práctica la deformación del EPS en estas aplicaciones sometidas a carga es

muy inferior al 10%. Los productos de EPS tienen una deformación por fluencia de compresión del 2% o menos, después de 50 años, mientras estén sometidos a una tensión permanente de compresión de  $0,30 \sigma_{10}$ .

Asimismo, es conocido por su excelente capacidad de aislamiento térmico frente al calor y al frío. De hecho, muchas de sus aplicaciones están directamente relacionadas con esta propiedad. Esta buena capacidad de aislamiento térmico se debe a la propia estructura del material que esencialmente consiste en aire ocluido dentro de una estructura celular conformada por el poliestireno. Aproximadamente un 98% del volumen del material es aire únicamente un 2% materia sólida (poliestireno). De todos es conocido que el aire en reposo es un excelente aislante térmico. La capacidad de aislamiento térmico de un material está definida por su coeficiente de conductividad térmica  $\lambda$  que en el caso de los productos de EPS varía, al igual que las propiedades mecánicas, con la densidad aparente.

En cuanto a sus condiciones en materia húmeda, no es higroscópico. Incluso sumergiendo el material completamente en agua los niveles de absorción son mínimos con valores oscilando entre 1% y el 3% en volumen (ensayo por inmersión después de 28 días). Al contrario de lo que sucede con el agua en estado líquido el vapor de agua sí puede difundirse en el interior de la estructura celular del EPS cuando entre ambos lados del material se establece un gradiente de presiones y temperaturas. Para determinar la resistencia a la difusión del vapor de agua se utiliza el factor adimensional  $\mu$  que indica cuantas veces es mayor la resistencia a la difusión del vapor de agua de un material con respecto a una capa de aire de igual espesor (para el aire  $\mu = 1$ ). Para los productos de EPS el factor  $\mu$ , en función de la densidad, oscila entre el intervalo  $\mu = 20$  a  $\mu = 100$ . Como referencia, la fibra de vidrio tiene un valor  $\mu = 1$  y el poliestireno extruido  $\mu = 150$ .

En cuanto a su estabilidad dimensional, los productos de EPS, como todos los materiales, están sometidos a variaciones dimensionales debidas a la influencia térmica. Estas variaciones se evalúan a través del coeficiente de dilatación térmica que, para los productos de EPS, es independiente de la densidad y se sitúa en los valores que oscilan en el intervalo  $5-7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , es decir entre 0,05 y 0,07 mm por metro de longitud y grado Kelvin. A modo de ejemplo, una plancha de aislamiento térmico de poliestireno expandido de 2 metros de longitud y sometida a un saldo térmico de  $20^\circ \text{C}$  experimentará una variación en su longitud de 2 a 2,8mm., por otra parte, no hay alteración a los cambios de temperatura

La radiación ultravioleta es prácticamente la única que reviste importancia. Bajo la acción prolongada de la luz UV, la superficie del EPS amarillea y se vuelve frágil, de manera que la lluvia y el viento logran erosionarla. Dichos efectos pueden evitarse con medidas sencillas, en las aplicaciones de construcción con pinturas, revestimientos y recubrimientos.

El poliestireno expandido no constituye sustrato nutritivo alguno para los microorganismos. Es imputrescible, no enmohece y no se descompone. No obstante, en presencia de mucha suciedad puede hacer de portador de microorganismos, sin participar en el proceso biológico. Tampoco se ve atacado por las bacterias del suelo. El EPS no tiene ninguna influencia medioambiental perjudicial no es peligroso para las aguas. Se pueden adjuntar a los residuos domésticos o bien ser incinerados, en este caso existe una polémica medioambiental acerca de la posibilidad de liberar dioxinas las cuales podrían ser perjudiciales tanto para la salud como para el medioambiente. En cuanto al efecto de la temperatura, mantiene las dimensiones estables hasta los 85° C.

#### Propiedades Biológicas del EPS

Las materias primas del poliestireno expandido son polímeros o copolímeros de estireno que contienen una mezcla de hidrocarburos de bajo punto de ebullición como agente de expansión. Todos ellos son materiales combustibles. El agente de expansión se volatiliza progresivamente en el proceso de transformación. El 10% residual requiere de una fase de almacenamiento durante un tiempo función de las especificaciones del producto: dimensiones, densidad, etc. En caso de manipulación de productos sin esta fase de almacenamiento se tomarán medidas de prevención contra incendios. Al ser expuestos a temperaturas superiores a 100°C, los productos de EPS empiezan a reblandecerse lentamente y se contraen, si aumenta la temperatura se funden. En ausencia de un foco de ignición de los productos de descomposición térmica no se inflaman hasta alcanzar temperaturas del orden de los 400 – 500 °C. El desarrollo y la amplitud del incendio depende, además de la intensidad y duración del mismo, de las propiedades específicas de las materias primas utilizadas en la fabricación del poliestireno expandido: estándar (M4) o autoextinguible (M1). Un material tratado con agentes ignífugantes (autoextinguible) se contrae si se expone a una llama. Sólo empezará a arder si la exposición se prolonga, a una velocidad de propagación muy baja, las llamas se propagan sólo en la superficie del material. Para calibrar las diferentes situaciones de riesgo que comporta el empleo de EPS, deben tenerse en cuenta factores derivados de su contenido, su forma y su entorno.

El comportamiento al fuego de los materiales de EPS puede modificarse aplicando recubrimientos y revestimientos.

## **Productos de unión apropiados**

### Megapplus

El Megapplus es un tipo de mortero, utilizado para unir las placas de poliestireno expandido, semejante al mortero cola, no obstante, con propiedades mejoradas. La composición de este mortero es de cemento blanco, mica, yeso y látex. El cemento blanco debe su color a la ausencia de óxidos férricos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que son los que le dan el característico color gris al cemento. También presenta cantidades reducidas de Mn en su composición. Para suplir la carencia de óxidos de hierro, se suele añadir óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) o criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). La composición química de los cementos blancos varía según el tipo resistente y el fabricante, pero la cantidad de óxido férrico no supera el 1%, siendo este porcentaje menor cuanto más blanco sea el cemento. Los cementos blancos poseen características mecánicas similares a las de los cementos grises. Existen cementos de las clases resistentes tipo I hasta tipo II, pero por su composición, no resisten condiciones agresivas, como el contacto con el agua de mar. Posee propiedades específicas de fraguado (ajustables), resistencia a la compresión y color entre otras. Estas propiedades son conferidas por su proceso de fabricación y por las materias primas, que aportan los compuestos químicos primordiales para el cemento.

En cuanto a otro componente la mica, es un mineral perteneciente a un grupo numeroso de silicatos de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos caracterizados por su fácil exfoliación en delgadas láminas flexibles, elásticas y muy brillantes, dentro del subgrupo de los filosilicatos. Su sistema cristalino es monoclinico. Generalmente se la encuentra en las rocas ígneas tales como el granito y las rocas metamórficas como el esquisto.

Las micas figuran entre los minerales más abundantes de la naturaleza. En total constituyen aproximadamente 3,8% del peso de corteza la terrestre, encontrándose, fundamentalmente en rocas intrusivas ácidas y esquistos micáceos cristalinos. La mica en bruto es posteriormente exfoliada, recortada y exfoliada para pasar a ser clasificada de acuerdo con el tamaño de los cuadrados obtenidos. Posteriormente, es clasificada de nuevo atendiendo a la transparencia, contenido de minerales extraños, lisura de la superficie, etc.

En cuanto al yeso es un producto preparado a partir de la piedra natural denominada aljez (sulfato de calcio dihidrato:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), mediante deshidratación, al que puede añadirse en fábrica determinadas adiciones de otras sustancias químicas para modificar sus características de fraguado, resistencia, adherencia, retención de agua y densidad, que una vez amasado con agua, puede ser utilizado directamente.

El látex natural es una suspensión acuosa coloidal compuesta de grasas, ceras y diversas resinas gomosas obtenida a partir del citoplasma de las células laticíferas presentes en algunas plantas angiospermas y hongos. Es frecuentemente blanco, aunque también puede presentar tonos anaranjados, rojizos o amarillentos dependiendo de la especie, y de apariencia lechosa. Una de las características más importante que poseen es la adherencia, tanto la adherencia mecánica, basada en la penetración de la cola o adhesivo en los poros de los materiales a ensamblar, como la adherencia química, basada en la unión química por contacto entre el adhesivo y la pieza.

El mortero Megaplus posee un alto porcentaje en látex (33%). El látex le proporciona mayor adherencia, cohesión interna, mayor resistencia al desgaste y a los agentes agresivos moderados, menor riesgo de fisuración y menor tendencia de disecación prematura (pérdida brusca de agua).

### Eco-revoque

El Eco-revoque es un mortero utilizado como revestimiento de las placas de poliestireno expandido. Este mortero tiene una composición de cemento blanco, mica, látex, un alto contenido de sílice y dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). Además, tiene alto contenido de material reciclado (60%).

El cemento blanco, la mica y el látex se han comentado anteriormente, por lo que se van a desarrollar las características del dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y la sílice u óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ).

La sílice es el mineral más abundante en la naturaleza. Ocho elementos componen cerca del 99% de la textura de la corteza terrestre. Estos elementos se asocian para formar los minerales. Los minerales silicatos y la sílice predominan en la mayoría de las rocas comunes, excepto la caliza. Los principales minerales de la sílice u óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) son el cuarzo, la calcedonia y el ópalo. Se encuentra cuarzo en la mayoría de las rocas magmáticas sedimentarias y metamórficas. Es un elemento característico de los granitos, los neises y las cuarcitas.

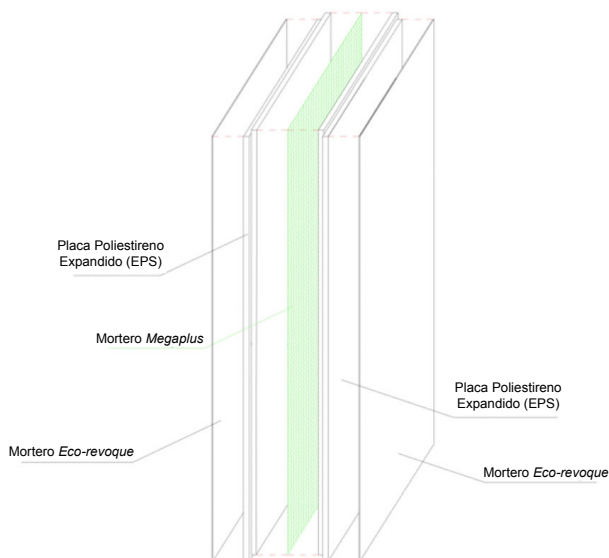
Una de las características más importantes es la dureza del mineral, posee una dureza de 7 en la escala de Mohs debido a su textura dura y cristalina. Puede encontrarse en diferentes colores dependiendo de su formación y pureza, puede ser blanco, transparente, amarillo, rosa, etc. Otra de las propiedades muy a tener en cuenta es que posee el más bajo coeficiente de expansión por calentamiento que cualquier otra sustancia conocida. Además, es insoluble. Entre sus propiedades físicas, destaca su punto de ebullición, de 2230 °C, su punto de fusión de 1703 °C, su densidad de 2,2 g/cm<sup>3</sup> y su masa modular de 60,1 g/mol.

El dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>) se encuentra en diferentes minerales: rutilo, anatasa, brookita, octahedrita, ilmenita, en los cuales posee diferentes estructuras y proporciones. Puede ser preparado por combinación directa de titanio y oxígeno, por tratamiento de sales de titanio en solución acuosa, por reacción de compuestos volátiles de titanio con oxígeno, oxidación o hidrólisis de compuestos orgánicos de titanio. Es insoluble en agua, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico frío, y su reactividad depende del tratamiento térmico previo. Entre sus propiedades físicas, destaca su punto de ebullición, de 5432 °C, su punto de fusión de 3380 °F, su densidad de 4,2 g/cm<sup>3</sup> y su masa modular de 79,9 g/mol.

Una de las propiedades más importantes que tiene este compuesto es la propiedad fotocatalítica y blanqueante. La fotocatalisis es un fenómeno natural, por el que una sustancia llamada fotocatalizador, activa un fuerte proceso de oxidación mediante la acción de la luz natural o artificial que provoca la transformación de sustancias orgánicas e inorgánicas nocivas en compuestos totalmente inocuos, es decir, la fotocatalisis acelera los procesos de oxidación que existen en la naturaleza. Favorece una descomposición más rápida de los contaminantes y evita su acumulación.

El mortero “Eco-revoque” tiene todas las propiedades de un mortero convencional pero además contiene un alto contenido de sílice lo que le proporciona una gran dureza, dióxido de Titanio que le concede la propiedad fotocatalítica y látex que le añade más adherencia.

Los materiales mencionados hasta ahora en este apartado son los que conforman el tabique de thermal-wall tanto para particiones interiores como para ser utilizado en trasdosados.



**Figura 3.** Thermal-wall viene preparado de fábrica en placas de 1,25 x 0,60 m de longitud.

A continuación, se tratará el material que se utilizará como elemento exterior, el fer-macell y las posibles soluciones de acabado que se ofrecen con este tipo de material.

## CONCLUSION

En la última década, el sector de la construcción de viviendas en España ha tenido un auge histórico, llegando a estructurar casi 800.000 viviendas nuevas un tercio del struct construido en la Unión Europea. Paradójicamente, este fenómeno no se ha aprovechado para impulsar el estructural del proceso industrializador e innovador del sector. La industria de la construcción es uno de los sectores más importantes y estratégicos para el estructural de un país, sus productos inciden de forma directa e indirecta en el progreso de la structur, es también una compleja y dinámica cadena de actividades sucesivas que se intercalan sujetas a una programación preestablecida y normalmente ejecutadas con un presupuesto fijado con anterioridad al inicio de la obra.

Las perspectivas de la construcción industrializada, hoy en día, se han diversificado las tendencias que impulsan en la dirección del estructural industrial. Entre ellas se apunta las siguientes:

- La necesidad de aumentar la productividad global en el sector de la edificación, a fin de bajar struc de producción, incrementando la capacidad de producción.

- Un crecimiento sostenido de la demanda de “calidad garantizada” a la que responde de forma más segura la producción industrial.
- La búsqueda del estructural sostenible en edificación a través de la producción industrial – propensa al ahorro de energía y materiales y en la que los desechos pueden reciclarse estructural que en la producción manual – estructura – en obra.
- Los modernos métodos estructural de producción y construcción son hoy más atractivos para la mano de obra especializada.

Hoy en día, es difícilmente imaginable un edificio sin ladrillos y menos todavía sin hormigón. Igual que se ha racionalizado la construcción de naves estructural por motivos de ahorro de material, en la construcción de viviendas debe ocurrir lo mismo, empezando por aligerar elementos masivos logrando una máxima eficiencia estructural.

## REFERENCES

- AAVV**, Código Técnico de la Edificación, Ahorro de Energía, Boletín Oficial del Estado, Madrid, 2009.
- AAVV**, Código Técnico de la Edificación, Protección Frente al Ruido, Boletín Oficial del Estado, Madrid, 2009.
- AAVV**, *Evaluación del Aislamiento acústico a Ruido Aéreo de Particiones Dobles Mediante Software de Predicción*, TecniAcustica, Valencia, Documento Técnico, 2003.
- Martín Rivas, F.**, (2005). “Escayolas y tabiquería en seco”. Monografías de la Construcción, Ceac, Madrid.
- Caparrós, LM., Giménez R., Vivó, C.**, (2001). “La cal y el yeso, revestimientos continuos en la arquitectura tradicional valenciana”. Colegio de Aparejadores y Arquitectos técnicos de Valencia.
- Periago, F., Tornero, J.**, (2008) “Guía de Materiales para una construcción sostenible”. Edita: Colegio de Colegios de Aparejadores y Arquitectos técnicos Región de Murcia.

<https://semplaster.com/blog/> (29/09/2021)    <http://3rdmillenniumproject.org/thermal-wall-technology/> (30/09/2021)



# MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO MEDIANTE LA REGULACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS COMPRESORES

Javier Cárcel-Carrasco<sup>1</sup>, Aurora Martínez-Corral<sup>2</sup>, Jaime Langa-Sánchez<sup>3</sup>, M.<sup>a</sup> del Carmen Carnero Moya<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universitat Politècnica de València (Spain). Email: [fracarc1@csa.upv.es](mailto:fracarc1@csa.upv.es)

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de València (Spain). Email: [aumarcor@csa.upv.es](mailto:aumarcor@csa.upv.es)

<sup>3</sup>Universitat Politècnica de València (Spain). Email: [jailansa@csa.upv.es](mailto:jailansa@csa.upv.es)

<sup>4</sup>Universitat Politècnica de València (Spain). Email: [carmen.carnero@uclm.es](mailto:carmen.carnero@uclm.es)

## ABSTRACT

Una parte fundamental del consumo eléctrico de las principales industrias del sector alimentario proviene de la producción de refrigeración, necesaria en todas las fases productivas. Por tanto, toda medida que tenga como objetivo optimizar el consumo eléctrico y aumentar la eficiencia de los sistemas de refrigeración industrial centralizados ayudará al derroche energético de la empresa, mejorando la fiabilidad y el mantenimiento. Actuar sobre la regulación de la capacidad de los compresores de potencia utilizados puede ser una buena forma de ahorrar energía. Este artículo muestra un caso estudiado por los autores en una empresa industrial del sector cárnico en España, donde los sistemas de refrigeración tienen una gran importancia en el proceso productivo. Muestra la metodología utilizada, la descripción de las acciones realizadas y los resultados obtenidos. Estas medidas combinadas supusieron una mejora, con un valor de ahorro energético que alcanzó los 400 MWh anuales, lo que supuso un equivalente en reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de 147,9 toneladas.

**Keywords:** Planta de refrigeración industrial; Industria de alimentos; Eficiencia energética; Compresores frigoríficos.

## INTRODUCTION

Este trabajo muestra las oportunidades potenciales de ahorro energético en una gran industria en sus instalaciones de refrigeración industrial, mediante la combinación del uso de la regulación de velocidad de los compresores con el control deslizante en los compresores de grandes frigoríficos. Para ello, se ha estudiado la producción frigorífica, considerando una gran fábrica de la industria cárnica ubicada en la Comunidad Valenciana, España (CARCEL CARRASCO *et al.*, 2013), analizando el consumo de energía eléctrica, sugiriendo las acciones a realizar y ejecutando las me-

didadas necesarias para lograr la máxima eficiencia en la producción de refrigeración industrial.

El consumo energético es considerable para este tipo de consumidor, y la industria cárnica ha sido identificada como uno de los segmentos más idóneos para la implementación de acciones de mejora de la demanda energética (Comisión Europea, 2009); Alfonso *et al.*, 2007). El calor, la ventilación y la refrigeración se encuentran entre las mayores cantidades de energía consumidas en los procesos de la industria cárnica (Ramírez *et al.*, 2006). El consumo de electricidad se utiliza principalmente para refrigeración y ventilación, mientras que los combustibles fósiles como el gas natural o el diésel se utilizan generalmente para el calentamiento de procesos. En la industria cárnica, la producción y distribución de refrigeración constituyen entre el 45% y el 55% del consumo final total de electricidad en días laborables (Ramírez *et al.*, 2006), lo que hace que este proceso sea más intensivo en energía para la mayoría de los consumidores de este segmento. En las industrias cárnicas, la demanda de energía para producir refrigeración industrial puede representar un porcentaje muy importante del consumo energético, generalmente superior al 50%. Existen estudios que se han realizado (Álvarez *et al.*, 2009; Alcázar-Ortega *et al.*, 2012) para evaluar la respuesta de la demanda de diferentes sectores (principalmente para los sectores comercial e industrial), donde tradicionalmente se ha relacionado la flexibilidad a la capacidad de un sistema para adaptarse a los cambios de producción (Hakam & Solvang, 2009; Zelenović, 1982) o puede absorber estos cambios dependiendo de cualquiera de las entidades del sistema o del entorno externo (Zahran *et al.*, 1990). Optimizar y mejorar la demanda energética en refrigeración puede ser un punto importante a conseguir en este tipo de industria.

La mejora de la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración industrial en la industria cárnica se ha analizado desde diferentes aspectos (Calm, 2002; Yang & Zhang, 2011; Aprea *et al.*, 2011; Bell & Groll, 2010; Escrivá-Escrivá *et al.*, 2010 ). En este trabajo se verán los resultados de la mejora de un gran sistema de refrigeración industrial, describiendo un caso práctico donde se han implementado medidas para la mejora energética de este sistema mediante la regulación de la velocidad de los motores eléctricos en combinación con la variación de la volumétrica. Relación de compresión por la regulación física del carro mecánico integrado en los compresores, permitiendo evaluar la efectividad de esta técnica en un sector tan prometededor como es la industria cárnica.

Este artículo analiza el estudio de un caso real en una industria cárnica de primer nivel ubicada en España, donde el consumo energético en refrigeración industrial es del 44,1% del total. El trabajo está organizado de la siguiente manera: En la sección 2 se describen las principales características del sistema de refrigeración industrial de la empresa. Posteriormente (Apartado 3) se exponen las medidas, realizadas para establecer el proceso de mejora combinando la regulación de velocidad con la regulación mecánica de deslizamiento de los compresores para adecuar la capacidad del sistema. Una vez analizada la capacidad de las diferentes líneas frigoríficas, en la Sección 4 se muestran las medidas adoptadas y los resultados obtenidos, que muestran importantes ahorros de energía en la planta frigorífica, cercanos a los 400 MWh anuales.

## **CASO DE ESTUDIO**

### Mejora de la capacidad de regulación en compresores de refrigeración.

La empresa estudiada es una gran industria ubicada en la Comunidad Valenciana en España, donde cuenta con un complejo compuesto por un centro de procesamiento de carne de vacuno rodeado de las instalaciones anexas necesarias para el buen funcionamiento de la actividad principal. En esta fábrica se ejecutan diariamente dos turnos de trabajo de 8 horas cada uno, más un tercer turno de limpieza.

Esta fábrica fue diseñada para operar con el mayor respeto por el medio ambiente, así como para lograr los más altos índices de eficiencia en operación, habiendo obtenido importantes premios nacionales e internacionales. El consumo de energía eléctrica se puede ver en los gráficos de la figura 1.2, donde se observa el perfil de consumo de energía eléctrica para las distintas épocas del año. Dentro del consumo de energía eléctrica de la fábrica, los sistemas de refrigeración suponen un porcentaje del 44,1% del total (Fig.3).

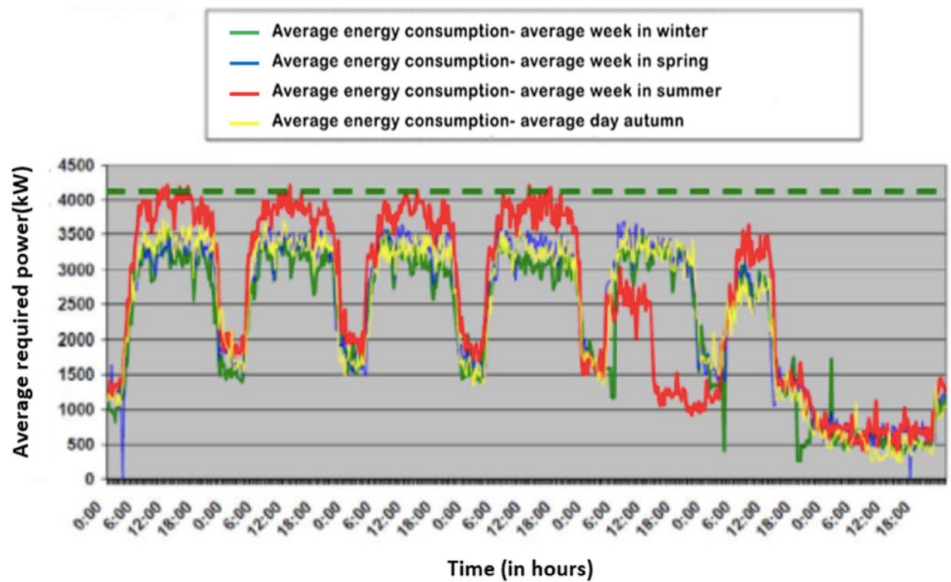


Figura 1. Perfil de consumo de energía eléctrica durante la semana promedio en fábrica.

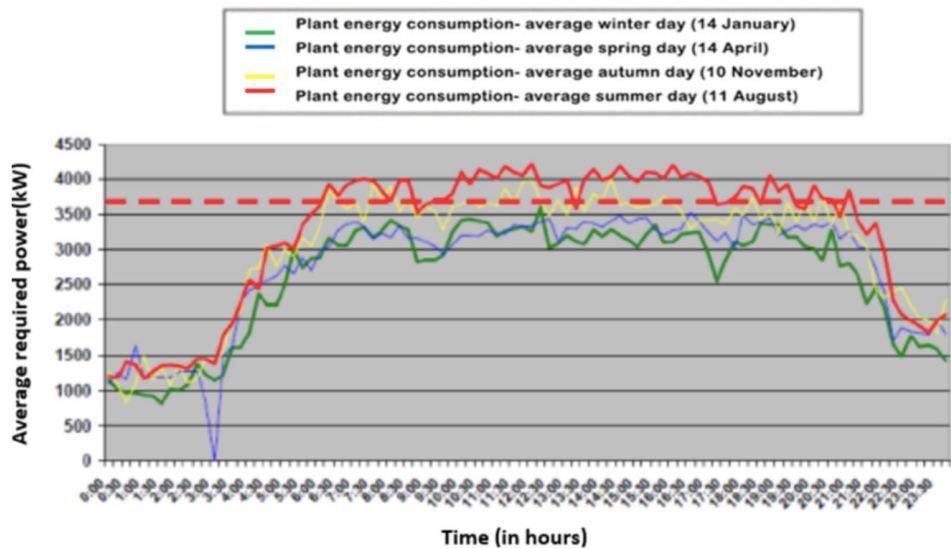
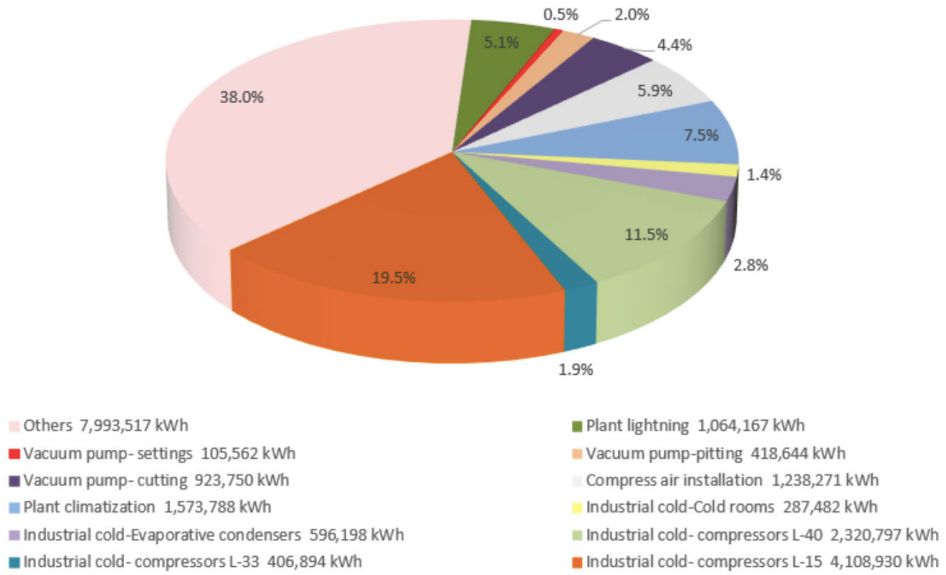
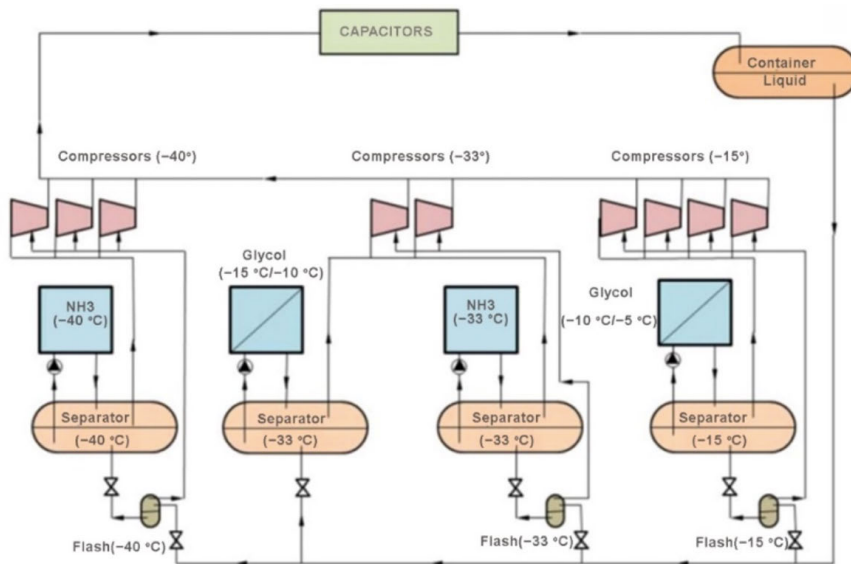


Figura 2. Perfil de consumo de energía eléctrica en fábrica durante cuatro periodos.



**Figura 3.** Sectorización del consumo eléctrico por principales instalaciones.

La planta frigorífica de la fábrica (Fig.4, 5) está formada por nueve compresores frigoríficos tipo tornillo que utilizan amoníaco (NH<sub>3</sub>) como refrigerante, que se distribuye a través de tres líneas principales (Fig.4). La línea N°1 a -40 °C de evaporación está asociada con los túneles de congelación, la línea N°2 a -33 °C de evaporación es para los procesos de tratamiento de carne y cámaras de congelación, y la línea N°3 a -15 °C de evaporación es para cámaras y las áreas de procesamiento de carne calentadas (Fig.4, 5). Los compresores utilizados en el sistema de refrigeración industrial tienen las características técnicas del equipo para los datos de funcionamiento específicos de los diferentes circuitos de refrigeración en funcionamiento, como se describe en la Tabla 1.



**Figura 4.** Diagrama principal del sistema de refrigeración



**Figura 5.** Vista de la sala de compresores de refrigeración industrial en estudio.

La regulación automática de la capacidad de los compresores frigoríficos se realiza mediante una función PID (proporcional, integral, derivada) integrada que modifica la ubicación del carro mecánico integrado en el compresor para adaptar la relación de compresión volumétrica ( $V_i$ ) a la condiciones de trabajo existentes (carga térmica), que se determinan a partir de la variación de la presión de aspiración (presión de evaporación) de los compresores.

Con la variación de la corredera, la cantidad de gas refrigerante impulsado se ve directamente afectada por la parte de recirculación del refrigerante aspirado antes de ser comprimido, reduciendo así significativamente el consumo de energía asociado.

Con la instalación de variadores de velocidad en los motores de los compresores, se entrega la frecuencia necesaria en función de la presión de succión del sistema de refrigeración; si aumenta, aumentará la frecuencia y velocidad de rotación, aumentando la capacidad del compresor hasta alcanzar la presión correspondiente a la temperatura de evaporación requerida.

| Denominación (ID) | Línea         | Potencia nominal en frío (Kw) | Potencia nominal absorbida (Kw) | Cos $\phi$ | V   | Capacidad media anual (%) |      | Horas de trabajo anuales (h) |
|-------------------|---------------|-------------------------------|---------------------------------|------------|-----|---------------------------|------|------------------------------|
| A9/C9             | NH3<br>-40 °C | 347,2                         | 394,3                           | 0,84       | 408 | 82                        | 74,9 | 4.318                        |
| A1/C1             |               | 227,8                         | 268,5                           | 0,91       | 408 |                           | 85   | 8.428                        |
| A2/C2             |               | 227,8                         | 268,5                           | 0,91       | 408 |                           | 84,5 | 1.931                        |
| A3/C3             | NH3<br>-33 °C | 110,4                         | 88,6                            | 0,77       | 408 | 75,9                      | 77,5 | 3.630                        |
| A4/C4             |               | 110,4                         | 88,6                            | 0,77       | 408 |                           | 74   | 3.062                        |
| A5/C5             | NH3<br>-15 °C | 1108,9                        | 336                             | 0,9        | 408 | 62,92                     | 70,8 | 5.634                        |
| A6/C6             |               | 1108,9                        | 336                             | 0,89       | 408 |                           | 61,3 | 3.342                        |
| A7/C7             |               | 1108,9                        | 336                             | 0,89       | 408 |                           | 55,8 | 3.254                        |
| A8/C8             |               | 1108,9                        | 336                             | 0,89       | 408 |                           | 52,2 | 1.478                        |

**Table 1.** Características técnicas y operativas de los equipos de refrigeración.

Los valores de voltaje y factor de potencia se han extraído de las mediciones realizadas durante la fase de recolección de datos. Los valores de la capacidad frigorífica se han obtenido de la aplicación informática del fabricante del compresor para los valores medios de presión de funcionamiento de los diferentes circuitos frigoríficos (Tabla 2):

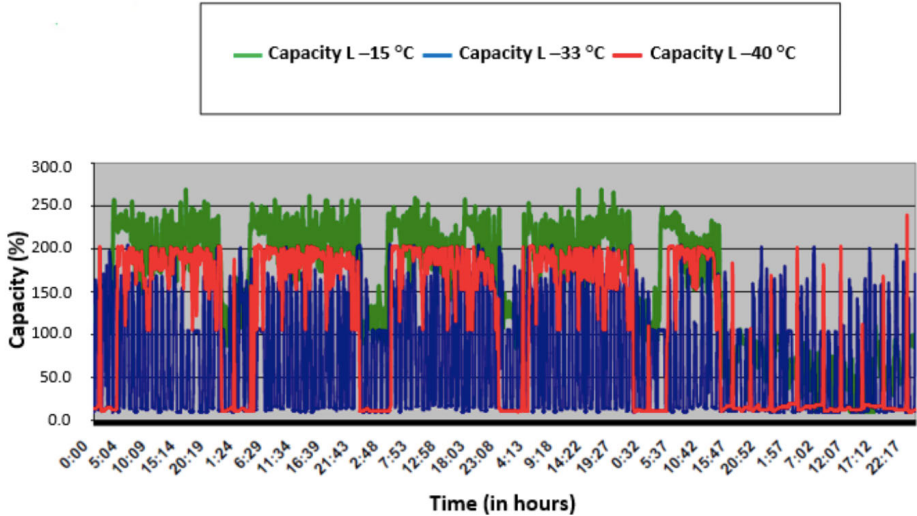
|                                | P <sub>aspiration</sub> | P <sub>condensation</sub> |
|--------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Circuit NH <sub>3</sub> -40 °C | 0,61 bar                | 12,40 bar                 |
| Circuit NH <sub>3</sub> -33 °C | 1,20 bar                | 12,60 bar                 |
| Circuit NH <sub>3</sub> -15 °C | 2,35 bar                | 12,20 bar                 |

**Tabla 2.** Valores medios de presión de funcionamiento de los circuitos frigoríficos

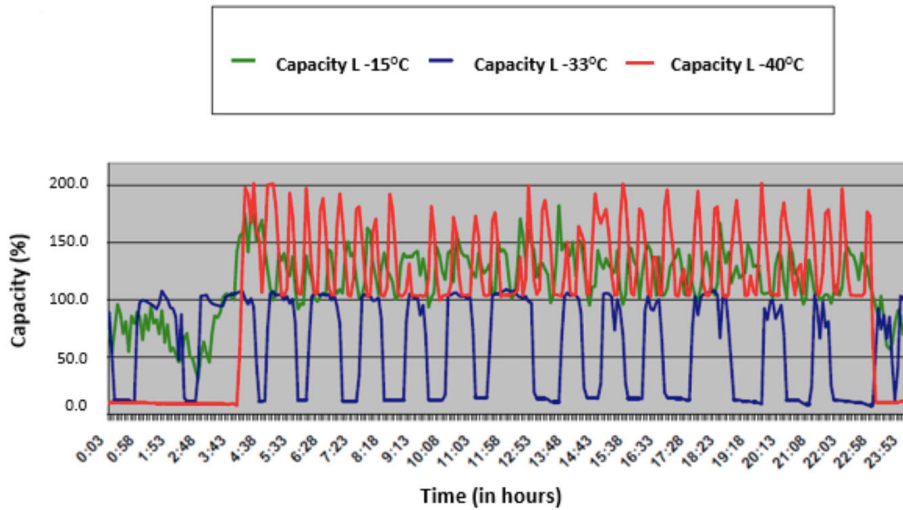
## MEDICIONES

En la Tabla 1 se puede ver cómo el trabajo entre los diferentes compresores de un mismo circuito está bastante distribuido. Este hecho, junto con el número de horas de trabajo anuales que es limitado ya que la instalación trabaja en dos turnos y no en tres, condiciona el retorno de la inversión para una solución general de variación de velocidad.

La figura 6 muestra gráficamente el perfil de funcionamiento obtenido de los diferentes grupos de compresores en una semana típica de verano, durante unos días de la primera semana de julio. De la misma forma, se realizaron mediciones más detalladas para un día típico de invierno durante el mes de febrero (Figura 7).

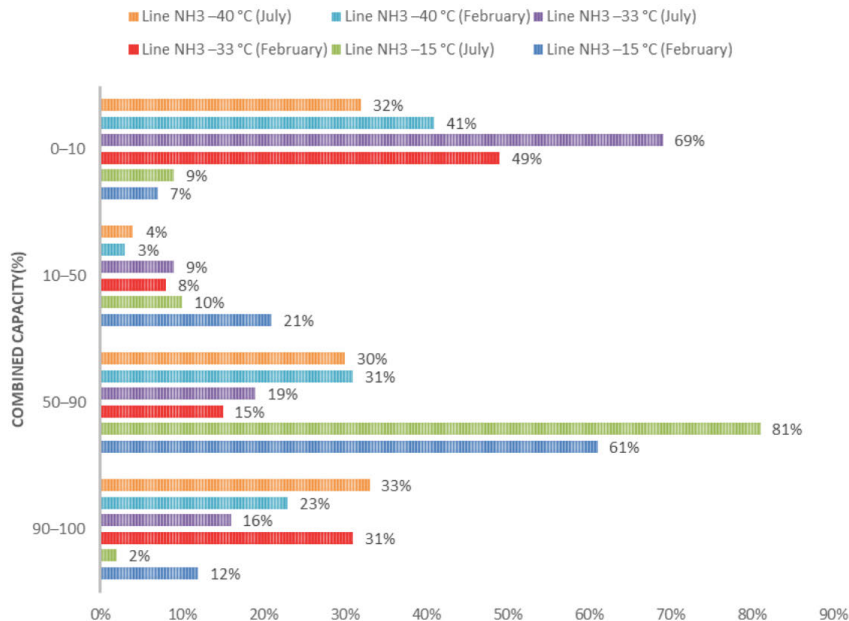


**Figura 6.** Perfil de funcionamiento de los diferentes grupos de compresores en el período estival.



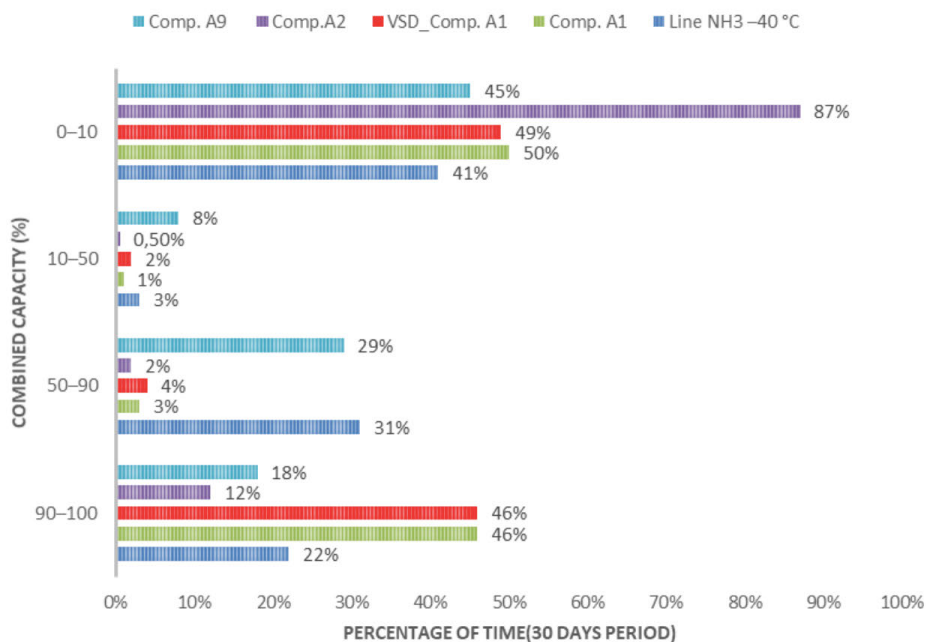
**Figura 7.** Perfil de operación para un día típico de febrero.

Los datos de la figura 6, 7 obtenidos de las mediciones de operación del sistema de control de las instalaciones de la fábrica ayudan a visualizar el modo de operación y el nivel de capacidad promedio de la instalación. Con el análisis de capacidad, fue posible medir el porcentaje de tiempo (en un período de 30 días) para un cierto nivel de capacidad para cada uno de los tres circuitos de refrigeración (Figura 8)



**Figura 8.** Análisis de capacidad para circuitos frigoríficos.

Un mayor detalle del análisis de capacidad independiente para cada una de las líneas muestra los resultados de cada una de las líneas: la línea del circuito de -40 ° C formada por tres compresores (A1, A2 y A9) (Fig.9); la línea del circuito de -33 ° C formada por dos compresores (A3 y A4) (Fig.10); la línea del circuito de -15 ° C formada por cuatro compresores (A5, A6, A7 y A8) (Fig.11).



**Figura 9.** Análisis de capacidad para el circuito de -40 ° C.

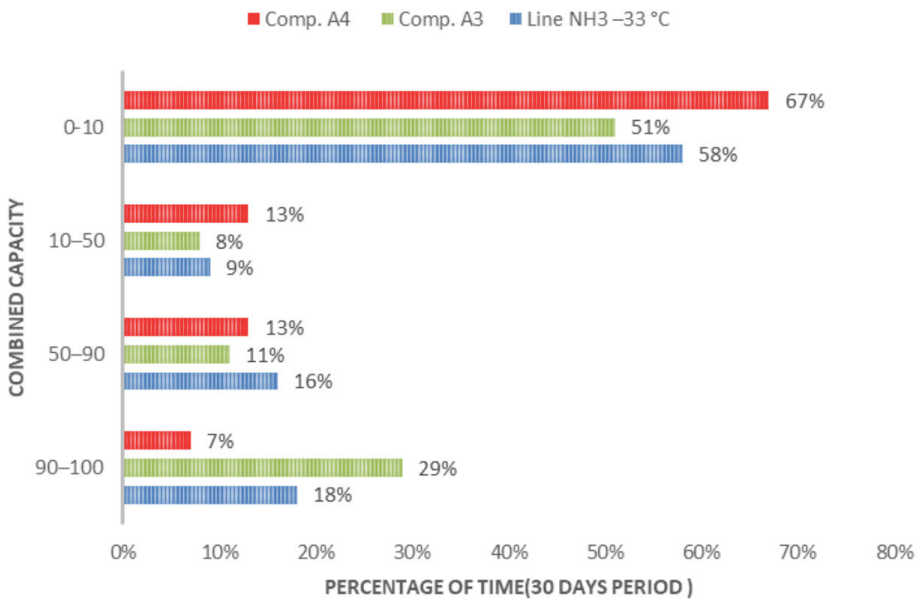
En la figura 9, las columnas rojas indican el porcentaje de tiempo que se encuentra en un cierto porcentaje (de capacidad) sobre las revoluciones nominales del compresor, a diferencia del resto de columnas que el eje de capacidad conjunta indica la posición promedio en la que se desliza se encuentra y por lo tanto el porcentaje de carga promedio del compresor.

En base a los resultados obtenidos, es fácil ver cómo solo el compresor A9 presenta una oportunidad en términos de regulación de capacidad mediante variación de velocidad (VSD), ya que el resto de compresores, incluido el compresor A1 que ya cuenta con VSD, están prácticamente por encima del 90% de todos. El tiempo o detenido, lo que limita en gran medida el retorno de la inversión de una solución de este tipo desde el punto de vista energético.

Cabe señalar que durante el análisis, se observa que la regulación de capacidad en el compresor A1 se realiza principalmente por deslizamiento. Como se puede observar

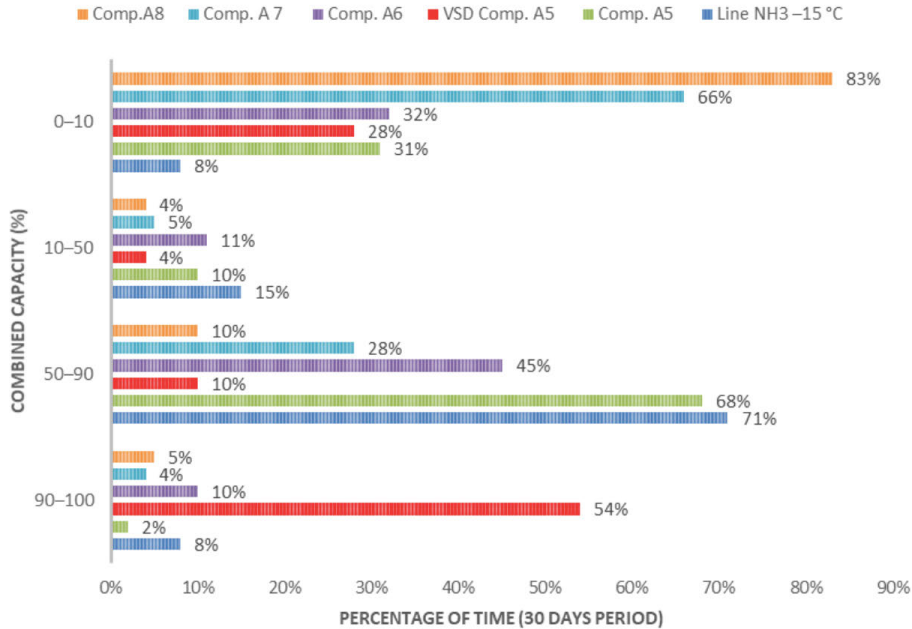
en la figura 9, la regulación de capacidad por variación de velocidad (columna roja) se produce de forma muy puntual y en cortos periodos de tiempo, resultando que el 95% de las veces, el compresor está parado o por encima del 90% de las revoluciones nominales del compresor.

En el análisis de capacidad del circuito a -33 ° C (Fig.10) formado por dos compresores (A3 y A4), más del 20% del tiempo, los compresores de este circuito están a carga parcial, lo que significa que casi 60 % del tiempo en paro, por lo que la solución de regulación de capacidad por variación de velocidad no es económicamente viable desde el punto de vista estrictamente de ahorro energético. A pesar de esto, puede haber otras razones técnicas y de confiabilidad que lo justifiquen.



**Figura 10.** Análisis de capacidad para el circuito de -33 ° C.

Para el circuito a -15 ° C, el análisis de capacidad de los cuatro compresores da los resultados reflejados en la figura 11.



**Figura 11.** Análisis de capacidad para el circuito de -15 °C.

Como en el caso del compresor A1 del circuito de -40 ° C, el compresor A5 está parado más del 85% del tiempo o funcionando por encima del 90% (columnas rojas) de la velocidad nominal del compresor (3000 rpm). A pesar de esto, en el mismo porcentaje de tiempo se encuentra entre el 50% y el 90% de la capacidad (columnas marrones), lo que indica que la regulación la realiza el deslizador prácticamente todo el tiempo, con la variación de velocidad operando en tiempo y forma. Conducta. Este último punto indica que probablemente, los variadores de velocidad tanto en el caso A1 como en el A5 parecen estar programados principalmente para arranques y no para regular la capacidad según criterios de eficiencia energética.

Los datos a destacar son que el conjunto de compresores se encuentra en una media del 70% del tiempo entre el 50% y el 90% de capacidad, hecho que apunta a una clara oportunidad de ahorro energético para la solución de ahorro energético propuesta.

A partir de este análisis de capacidad, se pueden establecer medidas de eficiencia energética mediante dos acciones de regulación de velocidad en los compresores A6 y A9, en combinación con la regulación de capacidad por la corredera.

## RESULTADOS OBTENIDOS

### Mejora de la Eficiencia Energética por Regulación de Velocidad en Compresores A6 y A9.

Para calcular el ahorro de energía para la solución de variación de velocidad en el compresor número 6, se considera el histograma de la figura 11 para determinar el número de horas que opera a un cierto grado de capacidad, así como los valores de COP (coeficiente de rendimiento), para los mismos porcentajes de capacidad, obtenidos a partir de los datos del fabricante, cuyo resultado se puede ver en la Tabla 3. El porcentaje de tiempo se basa en las horas máximas que se pueden trabajar por año (8760 h).

| COMP.A6      |        | Absorbed   | Refrigeration | COP      | Abs. Power | COP   | Specific | Estimated    |
|--------------|--------|------------|---------------|----------|------------|-------|----------|--------------|
| Capacity (%) | Time   | power (kW) | power (kW)    | (no VSD) | VSD (kW)   | (VSD) | saving   | saving (kWh) |
| 95–100       | 0,00%  | 313,20     | 1230,80       | 3,93     | 322,60     | 3,82  | 2,00%    | 0            |
| 90–95        | 9,97%  | 299,70     | 1144,40       | 3,82     | 299,52     | 3,79  | 0,69%    | 1.800        |
| 85–90        | 7,24%  | 290,40     | 1083,70       | 3,73     | 283,25     | 3,77  | -0,98%   | -1.808       |
| 80–85        | 12,57% | 281,30     | 1023,50       | 3,64     | 267,00     | 3,74  | -2,78%   | -8.627       |
| 75–80        | 7,08%  | 272,20     | 963,20        | 3,54     | 250,70     | 3,71  | -4,73%   | -7.992       |
| 70–75        | 5,99%  | 263,30     | 902,50        | 3,43     | 234,40     | 3,68  | -6,94%   | -9.591       |
| 65–70        | 3,98%  | 254,30     | 840,90        | 3,31     | 218,15     | 3,65  | -9,37%   | -8.301       |
| 60–65        | 2,92%  | 245,20     | 777,90        | 3,17     | 201,88     | 3,61  | -12,10%  | -7.580       |
| 55–60        | 2,42%  | 222,90     | 684,60        | 3,07     | 185,60     | 3,57  | -13,85%  | -6.554       |
| 50–55        | 3,90%  | 215,00     | 638,60        | 2,97     | 169,40     | 3,51  | -15,48%  | -11.379      |
| 45-50        | 2,22%  | 149,50     | 343,90        | 2,30     | 118,00     | 2,51  | -8,37%   | -12.408      |
| 40-45        | 1,32%  |            |               |          |            |       |          |              |
| 35-40        | 1,46%  |            |               |          |            |       |          |              |
| 30-35        | 1,40%  |            |               |          |            |       |          |              |
| 25-30        | 1,31%  |            |               |          |            |       |          |              |
| 20-25        | 1,39%  |            |               |          |            |       |          |              |
| 15-20        | 1,09%  |            |               |          |            |       |          |              |
| 10-15        | 1,14%  |            |               |          |            |       |          |              |
| 0-10         | 32,61% | 0,00       | 0,00          | 0,00     | 0,00       | 0,00  | 0,00     | 0,00         |

**Tabla 3.** Resultados de ahorro de energía debido a la variación de velocidad en el compresor No. 6.

El resultado de ahorro energético de este compresor es de 72.440 kWh (suma de todos los ahorros obtenidos por cada porcentaje de capacidad). Para estimar el ahorro total, hemos obtenido el ahorro sumando el ahorro del resto de compresores del circuito, ya que se supone que el compresor con variación de velocidad quedaría en la cola, regulando la capacidad del circuito y el resto podría mantenerse a niveles de capacidad del 100%, maximizando el COP de todos los compresores. De la misma forma, el análisis de ahorro realizado para el resto de compresores de la línea de -15 ° C es el siguiente: compresor A5: 62.865 kWh; compresor A6: 72.440 kWh; compresor A7: 45.804 kWh; compresor A8: 25.663 kWh.

El ahorro energético total anual con las medidas realizadas en el compresor A6, que regula la capacidad del circuito de -15 ° C, es de 206.772 kWh.

Aunque, como se mencionó anteriormente, el número de horas de funcionamiento es un factor limitante, es posible mantener un compresor en funcionamiento durante varias horas para maximizar el ahorro de energía.

A partir del análisis de capacidad realizado, se propuso optimizar la gestión de capacidad del compresor A6 del circuito de amoniaco a -15 ° C, integrando un variador de velocidad y gestionando la regulación del carro en conjunto con la variación de velocidad en función de la presión de succión (evaporación) para que el sistema pueda funcionar según el gráfico de la Fig.12, extraído de las características proporcionadas por el fabricante de los compresores de refrigeración.

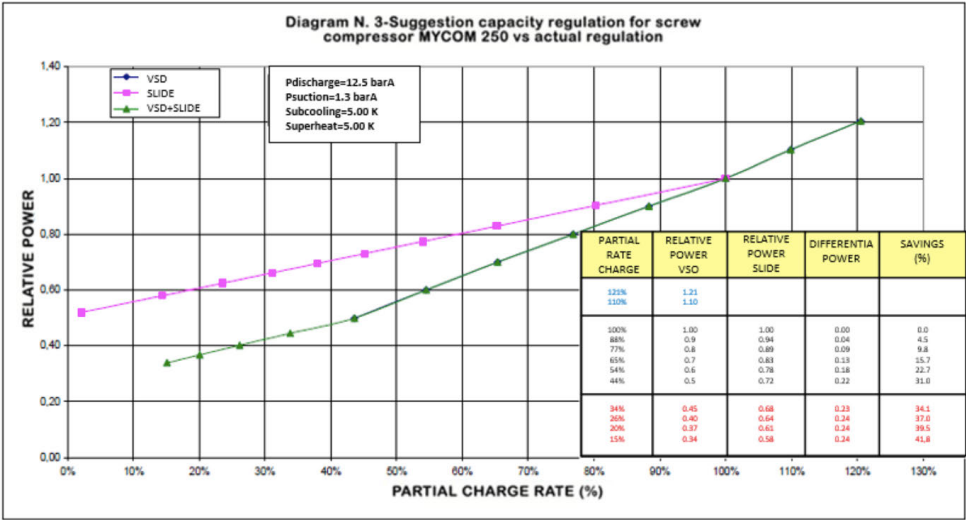


Figura 12. Gráfico de integración de la regulación de deslizamiento con variación de velocidad en los compresores N ° 6 y 9.

Como se puede apreciar en los datos de la Fig.12, en todo el rango de regulación (100% a 44%), límites impuestos por las condiciones de trabajo del motor / compresor (lubricación y ventilación) establecidos por el fabricante en cuanto a la velocidad de centrifugado (2950 rpm a 1475 rpm), se pueden lograr ahorros de hasta un 31%. También cabe destacar que para el rango de regulación superior (100% a 80%), el control de capacidad mediante el carro actúa de forma similar a las condiciones de variación de velocidad, con la consecuente reducción de oportunidades de ahorro energético.

Otro aspecto a destacar es que con la opción de variación de velocidad se puede ampliar el rango de trabajo hasta alcanzar la velocidad máxima de rotación permitida por el fabricante (consideraciones mecánicas) de 3.540 rpm, y de esta forma los compresores podrían ampliar su capacidad frigorífica teórica a 120 % del nominal. Esta posibilidad no se puede realizar mediante un control mecánico de deslizamiento.

Los variadores de velocidad serán los adecuados a la potencia del motor del compresor. Implicará la integración de señales de entrada / salida para regular la electrónica de los compresores, programación PLC (Programmable Logic Controller) integrando la rampa de control, así como una nueva instalación eléctrica para integrar armarios con variadores de velocidad y nuevo cableado eléctrico con la técnica requerida. condición para este tipo de instalación.

En el caso de la línea de  $-40^{\circ}\text{C}$ , para el cálculo de ahorro para la solución de variación de velocidad en el compresor número 9, se considera el histograma de la figura 9 para determinar el número de horas que opera a un determinado grado de capacidad, así como como los valores de COP para los mismos porcentajes de capacidad obtenidos de la aplicación informática del fabricante, el resultado se muestra en la Tabla 4. El porcentaje de tiempo se basa en las horas máximas que se pueden trabajar por año (8760 h).

| COMP.A6      |        | Absorbed   | Refrigeration | COP      | Abs. Power | COP   | Specific | Estimated    |
|--------------|--------|------------|---------------|----------|------------|-------|----------|--------------|
| Capacity (%) | Time   | power (kW) | power (kW)    | (no VSD) | VSD (kW)   | (VSD) | saving   | saving (kWh) |
| 95–100       | 13,53% | 270,10     | 403,90        | 1,5      | 278,20     | 1,45  | 2,00%    | 6.404        |
| 90–95        | 4,98%  | 259,00     | 354,90        | 1,37     | 248,84     | 1,43  | -3,92%   | -4.429       |
| 85–90        | 4,31%  | 251,80     | 323,50        | 1,28     | 230,30     | 1,4   | -8,54%   | -8.125       |
| 80–85        | 3,89%  | 245,40     | 294,80        | 1,2      | 213,31     | 1,38  | -13,08%  | -10.929      |

|       |        |        |        |      |        |      |         |         |
|-------|--------|--------|--------|------|--------|------|---------|---------|
| 75–80 | 3,40%  | 239,50 | 268,40 | 1,12 | 197,55 | 1,36 | –17,52% | –12.513 |
| 70–75 | 2,86%  | 234,00 | 243,90 | 1,04 | 182,82 | 1,33 | –21,87% | –12.809 |
| 65–70 | 2,44%  | 229,00 | 221,10 | 0,97 | 169,23 | 1,31 | –26,10% | –12.765 |
| 60–65 | 2,84%  | 224,30 | 199,50 | 0,89 | 156,04 | 1,28 | –30,43% | –16.979 |
| 55–60 | 2,84%  | 207,60 | 164,00 | 0,79 | 136,06 | 1,21 | –34,46% | –17.787 |
| 50–55 | 7,07%  | 204,70 | 152,10 | 0,74 | 131,84 | 1,15 | –35,59% | –45.119 |
| 45–50 | 0,71%  | 191,10 | 95,00  | 0,50 | 111,54 | 0,87 | –42,86% | –49.471 |
| 40–45 | 0,75%  |        |        |      |        |      |         |         |
| 35–40 | 0,74%  |        |        |      |        |      |         |         |
| 30–35 | 0,86%  |        |        |      |        |      |         |         |
| 25–30 | 0,86%  |        |        |      |        |      |         |         |
| 20–25 | 0,87%  |        |        |      |        |      |         |         |
| 15–20 | 0,84%  |        |        |      |        |      |         |         |
| 10–15 | 1,27%  |        |        |      |        |      |         |         |
| 0–10  | 44,95% | 0,00   | 0,00   | 0,00 | 0,00   | 0,00 | 0,00    | 0,00    |

**Tabla 4.** Resultados de ahorro energético por variación de velocidad en compresor N°. 9.

El resultado de ahorro energético de este compresor es de 184.522 kWh (suma de todos los ahorros obtenidos por cada porcentaje de capacidad). El ahorro energético total, considerando el ahorro obtenido al sumar el ahorro del resto de compresores del circuito con las medidas realizadas en el compresor A9 que regula la capacidad del circuito de  $-40^{\circ}\text{C}$ , es de 201.707 kWh.

De la misma forma que con el compresor A6 del circuito de  $-15^{\circ}\text{C}$ , y según el análisis de capacidad realizado, se propuso optimizar la gestión de capacidad del compresor A9 del circuito de amoníaco a  $-40^{\circ}\text{C}$ , integrando un variador de velocidad y gestionando la regulación de la corredera junto con la variación de velocidad en función de la presión de aspiración (evaporación), para que el sistema pueda funcionar según el gráfico de la Fig.12.

## DISCUSIÓN

En vista del estudio para mejorar la eficiencia energética del sistema de refrigeración industrial para una fábrica de procesamiento de carne, se ha observado que la combinación de medidas mediante variación de capacidad por deslizamiento mecánico de los compresores de refrigeración junto con acciones de variación de velocidad

produce mejores resultados. que se traducen en una mejora sustancial en la eficiencia energética combinada.

El análisis debe considerar la totalidad del sistema de producción de refrigeración considerando el número total de horas de funcionamiento; esto hace que se tome la mejor decisión, ya que no es necesario instalar regulación de velocidad en todos los motores eléctricos de los compresores, sino en aquellos que hacen que la regulación del sistema de refrigeración industrial sea más óptima a la capacidad conjunta. Esta medida reduce los costes de inversión a realizar para la mejora total del sistema.

Estas medidas combinadas mejoraron un ahorro energético cercano a los 400 MWh anuales, lo que supone una reducción equivalente de emisiones de CO<sub>2</sub> de 147,9 toneladas.

Asimismo, se ha comprobado que tras un periodo de aplicación de las medidas, existen otras ventajas además del ahorro energético, como una mejor mantenibilidad debido a una mejor distribución de capacidad y evitar que los componentes funcionen en horas excesivas y otras pocas. De la misma forma, la confiabilidad del sistema se ha incrementado debido a la reducción de fallas debido al funcionamiento más eficiente de los motores y la reducción de arranques.

Estos resultados colaterales son importantes en la operación y mantenimiento de este tipo de planta industrial (Carcel Carrasco *et al.*, 2013; Cárcel-Carrasco & Cárcel-Carrasco, 2021), siendo una de las áreas de preocupación para lograr industrias eficientes con respecto a medio ambiente (Ríos, 2006; Canales, 2005; Jacques, 2010; Schneider Electric, 2010). Con todo ello, se demuestra la importancia de combinar diferentes sistemas de regulación en compresores de refrigeración industrial con el fin de mejorar la eficiencia energética, de forma que pueda ser entendido por los profesionales del sector e introducir nuevas líneas de investigación para mejorar la eficiencia de estos sistemas.

## CONCLUSION

En grandes sistemas de refrigeración industrial con regulación de capacidad mediante un carro mecánico, fue interesante realizar el estudio en combinación con regulación de velocidad para optimizar la eficiencia conjunta.

Evidentemente, dada la complejidad de las instalaciones frigoríficas, la implementación de mejoras energéticas no siempre resulta en ahorros importantes, y en

algunos casos, pueden tener un impacto directo en la confiabilidad de las instalaciones, por lo que realizar estudios de viabilidad técnica y económica es esencial. Es importante señalar que, además del ahorro económico y el uso de variadores de velocidad que supondrá como control de capacidad en los compresores de tornillo, existen otras consideraciones que se deben tener en cuenta, como la mejora en el mantenimiento o el aumento de la fiabilidad del sistema.

La reducción de la capacidad debido a la variación de velocidad reducirá el desgaste y el daño de las válvulas deslizantes del compresor. La estabilidad de las presiones de succión se optimizará aún más ya que el control de capacidad es directo. Operar a velocidad reducida, si el perfil de carga así lo requiere, reducirá el desgaste de los elementos mecánicos del compresor. A nivel eléctrico, se mejorará el funcionamiento de la instalación y los motores, ya que con los variadores de velocidad el factor de potencia será constante muy cerca de 1, por lo que se reducirá la energía reactiva y la potencia de la instalación. Las medidas combinadas mejoraron el sistema de refrigeración con un ahorro energético cercano a los 400 MWh al año.

Se debe estudiar en detalle el uso de variadores de velocidad en motores estándar, ya que la reducción de velocidad implica una reducción lineal de la potencia (par constante), por lo que a velocidades de rotor bajas, el nivel de enfriamiento puede no ser el adecuado para extraer el calor generado, causando problemas de sobrecalentamiento. Esta situación se resuelve fácilmente con la inclusión de un accesorio de ventilación forzada, control de la temperatura del devanado (sondas térmicas) o control de sobrecargas del motor (módulo de control del variador).

## **ACKNOWLEDGEMENT**

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo mostrado por todo el personal técnico y directivo de la industria objeto de este artículo, así como al estudio realizado por el grupo industrial Schneider Electric España SA sobre eficiencia energética en el tema factoría de este estudio de caso.

## **References**

**Alfonso, D., Pérez-Navarro, A., Encinas, N., Álvarez, C., Rodríguez, J., & Alcázar, M.** (2007). Methodology for ranking customer segments by their suitability for distributed energy resources applications. *Energy Conversion and Management*. Retrieved 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890406003554>.

- Álvarez, C., Alcázar, M., Escrivá, G., & Gabaldón, A.** (2009). Technical and economical tools to assess customer demand response in the commercial sector. *Energy Conversion and Management*. Retrieved 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890409002301>.
- Alvarez, C., Gabaldon, A., & Molina, A.** (2004). Assessment and simulation of the responsive demand potential in end user facilities: Application to a university customer. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.*, 19, 1223–1231. <https://doi.org/10.1109/pes.2004.1372771>
- Alcázar-Ortega, M., Álvarez-Bel, C., Escrivá-Escrivá, G., & Domijan, A.** (2012). Evaluation and assessment of demand response potential applied to the meat industry. *Applied Energy*, 92, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.040>
- Aprea, C., Maiorino, A., & Mastrullo, R.** (2011). Change in energy performance as a result of a r422d retrofit: An experimental analysis for a vapor compression refrigeration plant for a walk-in cooler. *Applied Energy*, 88, 4742–4748. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.049>
- Bell, I. H., & Groll, E. A.** (2010). Air-side particulate fouling of microchannel heat exchangers: Experimental comparison of air-side pressure drop and heat transfer with plate-fin heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 31, 742–749. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.10.019>
- Calm, J. M.** (2002). Emissions and environmental impacts from air-conditioning and refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*, 25(3), 293–305. [https://doi.org/10.1016/s0140-7007\(01\)00067-6](https://doi.org/10.1016/s0140-7007(01)00067-6)
- Canales, C. C.** (2005). Guía de Mejores técnicas disponibles En España del Sector cárnico. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente.
- Carcel Carrasco, F., Roldan Porta, C., Grau Carrion, J.** (2013). La Sinergia Entre El Diseño De Planta Industrial Y Mantenimiento-Explotación Eficiente. Un Ejemplo De Éxito: El Caso Martínez Lorient S.A. *Dyna Ingenieria e Industria*, 89, 159–164. <https://doi.org/10.6036/5856>

- Cárcel-Carrasco, J., & Cárcel-Carrasco, J.-A.** (2021). Analysis for the knowledge management application in Maintenance Engineering: Perception from maintenance technicians. *Applied Sciences*, 11, 703. <https://doi.org/10.3390/app11020703>
- Escrivá-Escrivá, G., Segura-Heras, I., & Alcázar-Ortega, M.** (2010). Application of an energy management and control system to assess the potential of different control strategies in hvac systems. *Energy and Buildings*, 42, 2258–2267. <https://doi.org/10.1016/j.en-build.2010.07.023>
- EUROPEAN COMMISSION**, . (2009). The birth of a EUropean distributed EnErgy partnership ...CORDIS. Retrieved 2021, from <https://cordis.europa.eu/project/id/503516>.
- Hakam, M. H., & Solvang, W. D.** (2009). On flexibility and sustainability in container ports. 2009 IEEE/INFORMS International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics. <https://doi.org/10.1109/soli.2009.5203969>
- Jacques, S.** (2010). Ventajas del uso de los Variadores de Velocidad en la Circulación de Fluidos, Cuaderno técnico Nº 214. Schneider Electric. Retrieved 2021, from [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Cahier+Technique&p\\_File\\_Name=CT214.pdf&p\\_Doc\\_Ref=CT-214-2002](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Cahier+Technique&p_File_Name=CT214.pdf&p_Doc_Ref=CT-214-2002).
- RAMIREZ, C., PATEL, M., & BLOK, K.** (2006). How much energy to process one pound of meat. A comparison of energy use and specific energy consumption in the meat industry of four European countries. *Energy*, 31, 2047–2063. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.08.007>
- Rios, G.** (2006). LIMPIA producción MEDITERRÁNEO Centro DE Actividad REGIONAL para la PRODUCCIÓN Limpia (car/pl) Plan de ACCIÓN para el Mediterráneo. CARPL. Retrieved 2021, from [https://www.academia.edu/15796156/LIMPIA\\_producci%C3%B3n\\_MEDITER-%C3%81NEO\\_Centro\\_de\\_Actividad\\_Regional\\_para\\_la\\_Producci%C3%B3n\\_Limpia\\_CAR\\_PL\\_Plan\\_de\\_Acc%C3%B3n\\_para\\_el\\_Mediterr%C3%A1neo](https://www.academia.edu/15796156/LIMPIA_producci%C3%B3n_MEDITER-%C3%81NEO_Centro_de_Actividad_Regional_para_la_Producci%C3%B3n_Limpia_CAR_PL_Plan_de_Acc%C3%B3n_para_el_Mediterr%C3%A1neo).
- Schneider Electric**,.(2010). Guía Práctica De EFICIENCIA energética: Schneider Electric. Guía de Soluciones . Retrieved 2021, from <https://www.se.com/es/es/download/document/ESMKT12001H10/>.

- Zahran, I. M., Elmaghraby, A. S., & Shalaby, M. A.** (1990). Evaluation of flexibility in manufacturing systems. 1990 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1109/icsmc.1990.142058>
- Zelenović, D.** (1982). Flexibility condition for effective production systems. International Journal of Production Research, 20, 319–337. <https://doi.org/10.1080/00207548208947770>
- Yang, L., & Zhang, C.-L.** (2011). On Subcooler design for integrated TWO-TEMPERATURE supermarket refrigeration system. Energy and Buildings, 4(1), 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.016>

Ingeniería y Tecnología

