



# RETyCA

Revista de Tecnología y Ciencias Aplicadas

Volumen 8, No. 3

ISSN: 2524-9487

Agosto de 2025

**MEJORA CONTINUA EN LA GESTIÓN LOGÍSTICA  
MEDIANTE LA DEFINICIÓN DE KPIS Y LA  
IMPLEMENTACIÓN DE UN TABLERO DE CONTROL  
OPERATIVO**

Diego A. Werner

**RESTAURACIÓN Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL  
CABILDO DE SALTA: ANÁLISIS DOCUMENTAL Y  
TÉCNICO DE UNA OBRA EMBLEMÁTICA**

Silvina Echazú Lamas, Ivana Muñoz, Natalia Gil, Jorge Unzueta  
Perez

**ILUMINACIÓN EN VIVIENDA RURAL SOCIAL Y  
OBSERVANCIA DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO  
SOSTENIBLE**

Silvina Rigali, Alejandro Ferreiro, Carlos Juárez, Franco Fernández

**ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA PARA  
REACCIONES FLUIDO-SÓLIDO CON PARTÍCULAS DE  
DIFERENTES TAMAÑOS**

Enrique E. Tarifa, Sergio L. Martínez; S. Franco Domínguez, Álvaro F.  
Núñez

**NUEVAS CORRELACIONES PARA ESTIMAR EL  
TIEMPO DE RESIDENCIA PARA REACCIONES  
FLUIDO-SÓLIDO**

Enrique E. Tarifa, Carlos R. Vera

# RETyCA

Vol. 8 - Número 3

AGOSTO de 2025

---

ISSN 2524 -9487

## FACULTAD DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Universidad Nacional de Catamarca

### **EDITOR**

*DIRECTOR*

*Mgtr. María Alejandra Barrera*

*CODIRECTOR*

*Dra. Ivanna Maricruz Lazarte*

### **COMITÉ EDITOR**

*Dra. Erlinda del V. Ortiz*

*Mgtr. Carlos Gabriel Rosa Herrera*

*Dr. Fernando Torres*

*Dr. Cristian Ignacio Bevacqua*

*Mgtr. Marcos Darío Aranda*

*Mgtr. Ángel Omar Paris*

*Dra. Nancy Eugenia Nieva*

### **ASISTENTES DE EDICIÓN**

*Ing. Paola I. Beltramini*

*Mgtr. Sofía Gabriela Gómez*

### **COMITÉ ASESOR EN CONOCIMIENTO ABIERTO**

*Mgtr. Maria Vanesa Doria*

*Mgtr. Carola Victoria Flores*

**RETyCA**  
**(Revista de Tecnología y Ciencias Aplicadas)**

**FACULTAD DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CATAMARCA

**Vol. 8 - Número 3**

**Agosto de 2025**

ISSN 2524 -9487

Publicación en Open Access - Acceso abierto



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial- CompartirIgual 4.0 Internacional.

©Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca, Maximio Victoria 55 (4700) San Fernando del Valle de Catamarca - República Argentina.

Tapa y Diseño Interior: Guillermo Blanco  
Impreso en Argentina - Printed in Argentina  
Queda hecho el depósito que marca la ley N° 11.723  
Av. Belgrano 300 - Edif. Pab. 1 Variante I - Planta Alta - Predio Universitario  
C.P. 4700 - San Fernando del Valle de Catamarca - Provincia de Catamarca  
República Argentina

## ÍNDICE

MEJORA CONTINUA EN LA GESTIÓN LOGÍSTICA MEDIANTE LA DEFINICIÓN DE KPIS Y  
LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TABLERO DE CONTROL OPERATIVO

*Werner Diego A.*

Página 5

RESTAURACIÓN Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL CABILDO DE SALTA: ANÁLISIS  
DOCUMENTAL Y TÉCNICO DE UNA OBRA EMBLEMÁTICA

*Echazú Lamas Silvina, Muñoz Ivana, Gil Natalia, Unzueta Perez Jorge*

Página 19

ILUMINACIÓN EN VIVIENDA RURAL SOCIAL Y OBSERVANCIA DE LOS OBJETIVOS DE  
DESARROLLO SOSTENIBLE

*Rigali Silvina, Ferreiro Alejandro, Juárez Carlos, Fernández Franco*

Página 31

ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA PARA REACCIONES FLUIDO-SÓLIDO CON  
PARTÍCULAS DE DIFERENTES TAMAÑOS

*Tarifa Enrique E., Martínez Sergio L., Franco Domínguez, Núñez Álvaro F.*

Página 45

NUEVAS CORRELACIONES PARA ESTIMAR EL TIEMPO DE RESIDENCIA PARA  
REACCIONES FLUIDO-SÓLIDO

*Tarifa Enrique E., Vera Carlos R.*

Página 57



# MEJORA CONTINUA EN LA GESTIÓN LOGÍSTICA MEDIANTE LA DEFINICIÓN DE KPIS Y LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TABLERO DE CONTROL OPERATIVO

*Werner, Diego A. \**

\* *Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.*

\* [diegowerner1994@gmail.com](mailto:diegowerner1994@gmail.com)

**RESUMEN:** Con el objetivo de promover la mejora continua en la industria de mecanizado de transmisiones, este proyecto de graduación aborda la definición de KPIS y la posterior elaboración de un tablero de control operativo para el área de Logística. Este sector tiene un papel fundamental en la gestión de la cadena de suministro y en la coordinación de las diferentes actividades relacionadas con el transporte, almacenamiento y distribución de los componentes que conforman los vehículos, por lo que resulta esencial disponer de una metodología o herramienta que permita monitorear fácilmente los parámetros más relevantes. Para ello, en primer lugar, se determinan los aspectos de la organización que sean de mayor importancia para el sector, luego se seleccionan los indicadores claves de desempeño dentro de cada una de las temáticas y, a continuación, se definen los procedimientos adecuados para obtener y recolectar los diferentes datos. Finalmente, se procede al diseño y desarrollo del tablero de control. La aplicación de esta herramienta resulta trascendental para conseguir una mejor gestión, ya que permite tener una visión clara y en tiempo real del desempeño de los diferentes procesos y actividades relacionados con la cadena de suministro.

**Palabras claves:** Mejora continua, KPI, Poka-Yoke, Tablero de control operativo.

**ABSTRACT:** In order to promote continuous improvement in the transmission machining industry, this graduation project addresses the definition of KPIs and the subsequent development of an operational dashboard for the logistics area. This sector plays a fundamental role in supply chain management and in the coordination of the different activities related to the transport, storage and distribution of vehicle components, so it is essential to have a methodology or tool that allows easy monitoring of the most relevant parameters.

To achieve this, the most important aspects of the organization for the sector are first determined, then the key performance indicators are selected within each theme, and afterwards, the appropriate procedures are defined to obtain and collect the different data. Finally, the dashboard is designed and developed. The application of this tool is essential to achieve better management, as it provides a clear and real-time view of the performance of the different processes and activities related to the supply chain.

**Keywords:** Continuous improvement – KPI – Poka-Yoke – Operational dashboard.

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades

La planta donde se desarrolló el proyecto es una fábrica de mecanizado de componentes para vehículos, ubicada en Colombres, Cruz Alta, Tucumán. Esta planta es fundamental en la cadena de suministro global de la compañía, ya que sus productos son enviados a unidades de montaje en Brasil y Suecia.

Las piezas mecanizadas incluyen piñones, coronas, ejes, engranajes de cajas de cambio, carcasas, sincronizados, mitad de porta corona y palieres.

El flujo de trabajo comienza con la recepción de materia prima (“artículos brutos”) de proveedores de Argentina, Brasil y Europa. Estas piezas son almacenadas en un depósito central utilizando estanterías y apilamiento libre.

El proceso de mecanizado se divide en tres etapas que se desarrollan de forma secuencial:

- **Mecanizado en blando:** Incluye las operaciones de centrado, torneado y creación. Durante esta etapa es fundamental manipular las piezas con cuidado para evitar daños.
- **Tratamiento térmico:** Comprende los procesos de cementación y temple y revenido. La cementación enriquece la superficie de las piezas con carbono para aumentar la dureza superficial sin modificar el núcleo. El temple y revenido asegura que cada región de la pieza adquiera las propiedades adecuadas según su porcentaje de carbono.
- **Mecanizado en duro:** Abarca las operaciones de afilado y honing. Las directas, contraejes y engranajes pasan por un proceso adicional llamado shotpeening para mejorar su terminación superficial.

Entre cada una de estas etapas se utilizan “buffers” o áreas de almacenamiento intermedio.

Las piezas destinadas a la exportación a Suecia pasan a través de una cabina de deshumidificación

para prevenir la oxidación.

La producción se realiza en lotes, utilizando el método FIFO (First Input First Output) para el abastecimiento del material bruto a las líneas de blando.

El producto terminado se guarda en el almacén de producto listo para entrega (también denominado RTS, por sus siglas en inglés: Ready to ship) y posteriormente se lo exporta en su totalidad. Brasil es el destino que recibe la mayor parte de la producción (un 80% aproximadamente). El proceso total puede verse esquematizado en la Fig. 1.

## 1.2 Organigrama de la empresa

La estructura jerárquica de la organización consta de un director y 8 departamentos principales:

- Producción de Diferenciales
- Producción de Cajas de Cambio
- Logística y Calidad
- Ingeniería
- Mantenimiento
- Recursos Humanos
- Economía y IT
- Compras

Cada departamento está liderado por su respectivo gerente y se subdivide en áreas específicas.

El proyecto descrito en este documento fue desarrollado en el sector de Desarrollo Logístico e implementado en el área de Movimiento de Materiales, ambos pertenecientes al departamento de Logística y Calidad. Este departamento también incluye las áreas de Planeamiento y el Equipo de Calidad y Auditorías.

## 1.3 Funciones de las áreas logísticas

El sector logístico de la planta industrial es el

responsable de establecer la integración entre áreas y procesos para aumentar la eficiencia y el logro de objetivos de la empresa, además de crear y operar flujos conectados y sostenibles en una red logística global.

Las áreas que lo componen cumplen las siguientes funciones:

- Planeamiento: Se encarga de la planificación de toda la cadena de valor:
  - » Recepción de órdenes del cliente.
  - » Programación de materia prima, su transporte y documentación.
  - » Programación de todo el flujo de producción.
  - » Coordinación de exportación, su transporte y documentación.
- Movimiento de Materiales: Posee los equipos responsables del centro logístico, cubriendo las áreas de operación, control de embalajes y cumplimiento.

El enfoque del área es el mantenimiento de la operación de los diferentes almacenes (almacén central, plataforma logística y almacén RTS), así como su mejora continua.

Dado que es el sector responsable de la carga y descarga de camiones y de abastecer el material bruto a las líneas de blando, busca asegurar que el material será almacenado y enviado a sus clientes de manera organizada, ágil, segura y eficiente.

Se encarga además de la gestión y lavado de los embalajes, de las tareas de reenvasado y de la operación de la cabina de deshumidificación.

- Desarrollo Logístico: Busca la eliminación de desperdicios en las diferentes actividades logísticas a través de la mejora continua. Desarrolla proyectos que se enfocan en tres temáticas principales:

- » Disminuir el uso de autoelevadores en el interior de la fábrica, con el fin de reducir el riesgo de accidentes, simplificar los flujos, evitar demoras

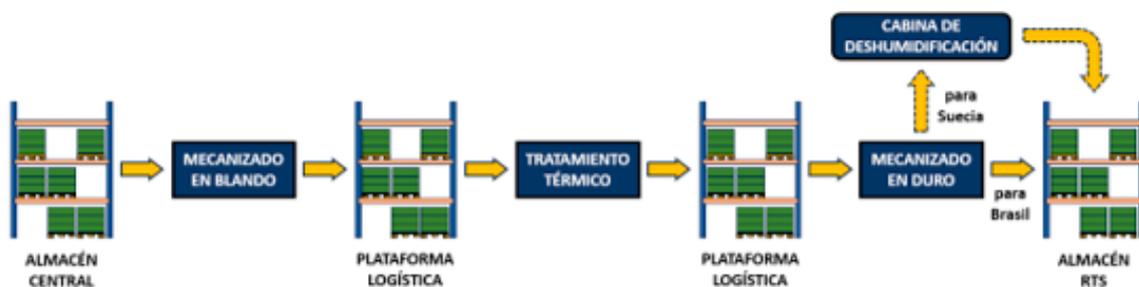


Figura 1: Proceso de mecanizado

en la producción y disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

- » Optimizar el uso y distribución de los diferentes almacenes, para conseguir el máximo aprovechamiento del espacio de almacenamiento y facilitar la búsqueda y ubicación de cajones, además de fomentar y respetar la aplicación del método FIFO.
- » Mejorar la circulación de camiones, con el objetivo de optimizar la eficiencia en la recepción de materia prima y entrega de productos terminados, reduciendo la congestión vehicular en las áreas de carga, descarga y en las zonas de espera.

#### 1.4 Situación actual del sector

En la actualidad, el área de Movimiento de Materiales enfrenta un desafío significativo debido a la falta de indicadores clave de desempeño (KPIs) claramente definidos. Esto se traduce en una carencia de sistemas y metodologías digitales establecidas que permitan la recopilación efectiva de información relevante para el sector.

Las consecuencias más notables de esto son:

- Dificultad en el seguimiento de operaciones y procesos: La falta de KPIs impide un análisis preciso y basado en datos reales sobre la trazabilidad de los productos, especialmente cuando surgen problemas de calidad.
- Toma de decisiones obstaculizada: La ausencia de información exacta y actualizada limita la capacidad de fundamentar las acciones necesarias para mejorar la gestión.
- Impacto en la efectividad de las reuniones RTM: Las reuniones diarias con los operarios de Logística, destinadas a compartir y discutir información importante para minimizar errores futuros y mejorar la calidad del servicio, se ven afectadas por la falta de datos concretos.

#### 1.5 Objetivos del Proyecto

Con el propósito de promover la mejora continua en la gestión logística, los objetivos del proyecto son definir indicadores clave de desempeño y desarrollar e implementar un tablero de control operativo para el área de Movimiento de Materiales. Además, esto permitirá:

- Lograr mayor eficiencia en los procesos.
- Disminuir los desperdicios asociados a las diferentes actividades del sector.
- Mejorar la calidad del servicio en la cadena de suministro.

- Conseguir una supervisión en tiempo real de las distintas tareas, lo que proporcionará una visión clara del desempeño de los procesos, abordando así las deficiencias actuales y sentando las bases para una gestión más eficiente y basada en datos sólidos.

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Mejora continua

La mejora continua es un enfoque metodológico que busca el perfeccionamiento constante de los procesos y actividades de una organización. Su objetivo principal es identificar y eliminar de manera progresiva los desperdicios, ineficiencias y obstáculos que puedan existir en la operación de una empresa.

Se apoya en la idea de que siempre hay margen para hacer las cosas mejor y que la evolución constante es esencial para mantener la competitividad en el mercado. Requiere la participación activa de todos los miembros de la organización en la identificación y solución de problemas.

#### 2.2 KPI (Indicadores clave de desempeño)

Los Indicadores Clave de Desempeño, o KPIs por sus siglas en inglés (Key Performance Indicators), son métricas o medidas cuantitativas que se utilizan para evaluar el rendimiento y el logro de objetivos específicos en una organización. Proporcionan información relevante y objetiva sobre el desempeño de procesos, áreas o departamentos, permitiendo tomar decisiones basadas en datos concretos.

Los KPI tienen como objetivos principales medir el nivel de servicio, realizar un diagnóstico de la situación, comunicar e informar sobre la situación y los objetivos, motivar a los equipos responsables del cumplimiento de los objetivos reflejados en el KPI y, en general, evaluar cualquier progreso de manera constante.

#### 2.3 Poka-Yoke

Poka-Yoke es un concepto japonés que significa "a prueba de errores" o "a prueba de fallos". Se refiere a la implementación de mecanismos o dispositivos diseñados para prevenir errores humanos o problemas en los procesos. Estos mecanismos son diseñados de manera que, si se comete un error o una acción incorrecta, se detecta inmediatamente y se evita que el error se propague o cause un problema mayor.

Los Poka-Yokes son una forma efectiva de garantizar la calidad y la prevención de errores en la fabricación y los procesos de servicio, lo que permite mejorar la eficiencia al minimizar el retrabajo. Pueden ser dispositivos físicos, como sensores, o procedimientos específicos que guían a los trabajadores para evitar acciones incorrectas.

## 2.4 RTM (Gestión en tiempo real)

La Gestión en Tiempo Real, o RTM por sus siglas en inglés (Real Time Management), se refiere a la capacidad de monitorear y tomar decisiones inmediatas basadas en datos y eventos en tiempo real. Permite seguir y controlar los procesos en curso, identificar problemas en su fase inicial y responder de manera inmediata para minimizar el impacto negativo.

Se basa en la disponibilidad de datos precisos y actualizados, así como en sistemas de información que permiten la toma de decisiones ágil y eficaz. Esto implica el uso de tecnologías como sensores y sistemas de seguimiento en tiempo real.

## 2.5 Tablero de control operativo

Un tablero de control es una herramienta visual cuyo objetivo y utilidad básica es diagnosticar adecuadamente la situación de una organización. Ballvé (2001) lo define como “el conjunto de KPIs cuyo seguimiento periódico permitirá contar con un mayor conocimiento de la situación de su empresa o sector apoyándose en nuevas tecnologías informáticas”.

El tablero suele presentar KPIs de manera clara y concisa utilizando el color de las luces, gráficos y métricas clave para permitir a los responsables tomar decisiones informadas de manera rápida y efectiva.

Según Ballvé, existen cuatro tipos de tableros de control:

- Operativo: Sirve para que en un simple golpe de vista podamos evaluar diariamente los indicadores operativos más relevantes. Permite monitorear el estado de sectores o procesos específicos, facilitando la acción inmediata y contribuyendo a la mejora continua de los procesos.
- Directivo: Permite monitorear los resultados internos de la empresa en el corto plazo (mensual).
- Estratégico: Proporciona información interna y externa para conocer el posicionamiento estratégico y a largo plazo de la empresa.

- Integral: Ofrece a la alta dirección una visión integral de la situación de la empresa, englobando las perspectivas operativa, directiva y estratégica.

## DESARROLLO DEL TABLERO DE CONTROL OPERATIVO

### 3.1 Identificación de los objetivos estratégicos

Se parte de un diagrama previamente definido por la empresa que refleja su modelo de pensamiento. Este diagrama incluye los principios y valores fundamentales, y en su centro se encuentran las cuatro prioridades clave que guían todas las decisiones y acciones de la compañía:

- Seguridad: Considerada la máxima prioridad. Garantizar la seguridad de los empleados y la protección de los recursos es un compromiso inquebrantable. Constantemente se investigan formas de mejorar la seguridad en el lugar de trabajo y minimizar riesgos.
- Calidad: Se busca mantener estándares de calidad excepcionales en productos y servicios, asegurando que cumplan con las expectativas de los clientes y se adhieran a las normas más exigentes de la industria.
- Entrega: La puntualidad y eficiencia en la entrega son fundamentales para la satisfacción del cliente y el funcionamiento sin problemas de la cadena de suministro. La empresa se compromete a cumplir con los plazos de entrega establecidos.
- Costos: La gestión eficiente de costos es esencial. Se busca optimizar procesos y reducir costos sin comprometer la seguridad, calidad o entrega, alineándose con la búsqueda de eficiencia en todas las áreas.

Cada una de estas prioridades desempeña un papel crítico en la estrategia de la empresa y son esenciales para el éxito continuo de sus operaciones.

### 3.2 Selección de KPIs

Se realiza teniendo en cuenta las prioridades estratégicas de la organización, asegurando que los indicadores elegidos para el área de Movimiento de Materiales se alineen con los valores y objetivos fundamentales de la empresa.

Dentro de la temática de seguridad, se identifican dos puntos esenciales con sus respectivos KPIs:

- 1) Incidentes: Son eventos inesperados o no deseados que ocurren en el entorno laboral y que podrían haber causado daños, pero no lo hicieron.

Su registro proporciona una oportunidad para identificar riesgos y prevenir accidentes futuros.

- N.º de incidentes por sector.
- N.º de incidentes abiertos.
- N.º de incidentes por turnos.
- N.º de incidentes por importancia.
- Tasa de incidentes por riesgo.

1) Accidentes: Son eventos no deseados que ocurren en el lugar de trabajo y resultan en lesiones personales, daños materiales o ambas cosas. Su registro es esencial ya que requieren una investigación para determinar las causas subyacentes y tomar medidas correctivas para prevenir su recurrencia.

- N.º de accidentes por sector.
- N.º de accidentes por turno.
- Tasa de accidentes por categoría.
- Tasa de accidentes por lugar.

En relación a la calidad, se reconocen cuatro puntos de interés con sus correspondientes KPIs:

2) Cajones retornados por desvíos de calidad: Son cajones de materia prima que se devuelven al almacén central luego de ser enviados a las líneas de producción debido a desviaciones de calidad en el material bruto. Su registro permite analizar la trazabilidad de los artículos y detectar si los cajones permanecieron demasiado tiempo almacenados, si los métodos de embalaje preestablecidos no son adecuados o si los proveedores incumplieron con los estándares de calidad.

- N.º de cajones retornados por desvíos de calidad.
- N.º de cajones retornados por desvíos de calidad por artículo.

3) Cajones mal identificados: Son cajones de materia prima que cuentan con errores en el registro y etiquetado, como números de artículo o colada incorrectos. Registrarlos ayuda a prevenir el abastecimiento de líneas de producción con material bruto equivocado, lo que podría provocar averías en las máquinas industriales ya que cada una es configurada de forma específica (se les realiza un set up distinto) según el artículo y colada.

- N.º de cajones mal identificados.
- N.º de cajones mal identificados corregidos.

4) Cajones a retornar de almacén RTS: Son cajones de producto terminado guardados en el almacén RTS que se devuelven a las líneas de producción por diversas razones, como desviaciones de calidad detectadas en el laboratorio. Registrar estos hechos posibilita conocer los movimientos del almacén y evitar las posibles diferencias de stock que puedan surgir.

- N.º de cajones a retornar de RTS.
- N.º de cajones a retornar de RTS por artículo.

5) Cajones procesados en la cabina de deshumidificación: Son cajones de producto intermedio que pasan por la cabina de deshumidificación. Su registro fortalece la trazabilidad y ayuda a identificar si las desviaciones de calidad detectadas posteriormente son causadas por la incorrecta permanencia o las inadecuadas condiciones de temperatura (T) y humedad (H) en la cabina.

- Tiempo transcurrido.
- N.º de cajones procesados.
- N.º de cajones procesados por estatus.
- Promedio de T y H.
- N.º de mediciones erróneas de T y H.
- N.º de paradas de operación por tipo.

En cuanto a la entrega, se establecen cuatro temas importantes, con sus respectivos KPIs:

1) Camiones descargados: Comprende a los camiones con material bruto que arriban de distintos proveedores nacionales y extranjeros y a los camiones con embalaje provenientes de Brasil, que son descargados en la planta industrial. Registrarlos permite un seguimiento más preciso de las fechas de llegada y ayuda a identificar posibles demoras y sus causas.

- N.º planificado de camiones a descargar.
- Tasa de camiones descargados.

2) Facturas ingresadas y cerradas: Tras descargar los camiones con materia prima, las facturas de los artículos enviadas por los proveedores deben ser ingresadas y cerradas en el sistema correspondiente. Esto permite que los cajones con brutos asociados a esas facturas estén disponibles en el sistema de la compañía, es decir, se sumen al stock del almacén.

- N.º de facturas ingresadas y cerradas.

3) Camiones exportados y despachos: Son aquellos camiones cargados con cajones de producto terminado, destinados a transportar el material a Brasil o al puerto desde donde partirá en barco rumbo a Suecia. Los despachos son los camiones cargados con materia prima que viajan desde la planta industrial hasta los almacenes tercerizados, utilizados para guardar material bruto cuando la capacidad del almacén central se encuentra cubierta completamente. Registrarlos ayuda a conocer si se satisface la demanda de los clientes en tiempo y forma, si las empresas transportistas cumplen con la planificación establecida, y permite estar al tanto de las posibles demoras (y sus motivos).

- N.º planificado de camiones a exportar y despachar.

- Tasa de camiones exportados y despachados.

4) Flujos parados por falta de materia prima: La fabricación de piezas en las distintas líneas productivas se ve interrumpida en ocasiones por la falta de materia prima. Registrar estas ocurrencias ayuda a analizar si existe un faltante de material bruto en el almacén central, provocado por una incorrecta planificación, o si las frecuencias de abastecimiento de los operarios desde el almacén hacia las líneas son inadecuadas.

- N.º de paradas.
- Tiempo perdido.
- N.º de paradas por línea.
- N.º de paradas por artículo.

En este proyecto no se incluye la selección de los KPIs relacionados con los costos. Para los líderes del sector resulta preferible analizar y dar seguimiento a los indicadores relacionados con las restantes temáticas en las reuniones RTM, donde se utilizará principalmente esta herramienta. Si bien los costos son un aspecto relevante en todas las áreas de la organización, se considera que esta división facilita un análisis más profundo de los KPIs que tienen mayor influencia en el día a día operativo, evitando la sobrecarga de información en el tablero, lo que podría dificultar su uso efectivo.

### 3.3 Definición de criterios de medición

Se establecen las reglas y estándares para evaluar y medir el desempeño de cada métrica. A continuación, se detallan los criterios de medición para cada temática:

#### Seguridad:

- Indicadores de incidentes:
  - » N.º de incidentes por sector: Evaluación diaria y mensual en cada sector y en toda la planta. Considerado fuera de situación normal si hay al menos un incidente.
  - » N.º de incidentes abiertos: Solo se consideran los incidentes en estado abierto, es decir, aquellos cuyas causas aún no han sido tratadas para evitar que vuelvan a ocurrir.
  - » N.º de incidentes por turnos: Clasificación según turno de trabajo.
  - » N.º de incidentes por importancia: Clasificación según importancia del incidente (importante, moderado, trivial).
  - » Tasa de incidentes por riesgo: Porcentaje de incidentes por riesgo con respecto al total.
- Indicadores de accidentes:
  - » N.º de accidentes por sector: Evaluación diaria y mensual en cada sector y en toda la planta. Considerado fuera de situación normal si hay al menos un accidente.

- » N.º de accidentes por turno: Clasificación según turno de trabajo.
- » Tasa de accidentes por categoría: Porcentaje de accidentes por categoría con respecto al total.
- » Tasa de accidentes por lugar: Porcentaje de accidentes por lugar (zona del sector) con respecto al total.

#### Calidad:

- Indicadores de cajones retornados por desvíos de calidad:
  - » N.º de cajones retornados por desvíos de calidad: Evaluación diaria y semanal. Considerado fuera de situación normal si hay al menos un cajón retornado.
  - » N.º de cajones retornados por artículo: Clasificación según número de artículo.
- Indicadores de cajones mal identificados:
  - » N.º de cajones mal identificados: Evaluación diaria y semanal. Considerado fuera de situación normal si hay al menos un cajón mal identificado.
  - » N.º de cajones mal identificados corregidos: Clasificación según si el error fue corregido o no.
- Indicadores de cajones a retornar de almacén RTS:
  - » N.º de cajones a retornar de RTS: Evaluación diaria y semanal. Considerado fuera de situación normal si hay al menos un cajón retornado.
  - » N.º de cajones a retornar de RTS por artículo: Clasificación según número de artículo.
- Indicadores de cajones procesados en la cabina de deshumidificación:
  - » Tiempo transcurrido: Mide el tiempo que cada cajón permanece en la cabina. Valor de referencia: 30 minutos (tiempo mínimo). Considerado fuera de situación normal si hay al menos un cajón en el día que no cumple con el valor de referencia.
  - » N.º de cajones procesados: Evaluación diaria. Valor de referencia: 126 cajones por día.
  - » N.º de cajones procesados por estatus: Clasificación según estatus (OK, No OK, Mal Registrado).
  - » Promedio de T y H: Media diaria de T y H en el interior de la cabina. Valores de referencia: 16-23 °C para temperatura y 30-64% para humedad. Considerado fuera de situación normal si el promedio de T y H en el día se encuentra fuera de los límites establecidos.
  - » N.º de mediciones erróneas de T y H: Evaluación diaria de mediciones fuera de los intervalos especificados.
  - » N.º de paradas de operación por tipo:

Clasificación de paradas según tipo (falta de material, capacitación, etc.).

Entrega:

- Indicadores de camiones descargados:
  - » N.º planificado de camiones a descargar: Cantidad diaria de camiones con turno reservado para descarga.
  - » Tasa de camiones descargados: Relación entre el número real de camiones descargados y el planificado. Considerado fuera de situación normal si el cociente difiere de 1.
- Indicadores de facturas ingresadas y cerradas:
  - » N.º de facturas ingresadas y cerradas: Cantidad diaria y semanal de facturas gestionadas. Considerado fuera de situación normal si hay al menos una factura no ingresada.
- Indicadores de camiones exportados y despachos:
  - » N.º planificado de camiones a exportar y despachar: Cantidad diaria de camiones con turno reservado para carga.
  - » Tasa de camiones exportados y despachados: Relación entre el número real de camiones exportados y despachados y el planificado. Considerado fuera de situación normal si el cociente difiere de 1.
- Indicadores de flujos parados por falta de materia prima:
  - » N.º de paradas: Evaluación diaria y semanal de interrupciones en las líneas de producción. Considerado fuera de situación normal si hay al menos una parada.
  - » Tiempo perdido: Tiempo total de inactividad debido a paradas.
  - » N.º de paradas por línea: Clasificación según línea de producción.
  - » N.º de paradas por artículo: Clasificación según artículo faltante.

Estos criterios de medición proporcionan un marco estructurado para evaluar y analizar los KPIs, permitiendo un monitoreo efectivo y facilitando la identificación de áreas de mejora en la gestión logística del área de Movimiento de Materiales.

### 3.4 Desarrollo y establecimiento de sistemas de medición

#### 3.4.1 Identificación de los sistemas de medición existentes

Antes de desarrollar nuevos sistemas de medición, es esencial identificar los sistemas actualmente en uso en la organización para determinar si alguno de los programas informáticos ya desarrollados

permite registrar y obtener datos relevantes de manera constante y precisa para los indicadores seleccionados. Los resultados de esta actividad son los siguientes:

**Tabla 1:** Relevamiento de software y bases de datos desarrolladas por la empresa

Temática	Aspectos de interés	Bases de datos existentes
Seguridad	Incidentes	Zyght
	Accidentes	Zyght
Calidad	Cajones retornados por desvíos de calidad	×
	Cajones mal identificados	×
	Cajones a retornar de almacén RTS	SAIUS
	Cajones procesados en la cabina de deshumidificación	×
Entrega	Camiones descargados	×
	Facturas ingresadas y cerradas	×
	Camiones exportados y despachos	×
	Flujos parados por falta de MP	Chronos + Excel

La evaluación inicial revela que el 40% de los sistemas de medición esenciales ya se encuentran en funcionamiento y han sido implementados con éxito. El 60% restante requiere desarrollo y puesta en práctica para asegurar la recolección completa de toda la información clave.

Los sistemas identificados son:

- Zyght: Está dedicado al registro de incidentes y accidentes. La carga de datos es responsabilidad del personal del sector donde ocurrió el hecho.
- SAIUS: Se centra en la gestión de almacenes, proporcionando información sobre transacciones, stock, inventario, ubicación y movimientos de los cajones en diferentes depósitos. La carga de datos es responsabilidad del personal logístico.
- Chronos: Proporciona información sobre el programa de producción y el estado actual de cada línea. En caso de interrupciones en la fabricación, los operarios líderes son los encargados de reportar dichos eventos en la aplicación.

Las líneas de palieres y mitad de porta corona

actualmente no cuentan con la tecnología necesaria para implementar este sistema y utilizan un archivo de Excel denominado “Gestión RTM”.

### 3.4.2 Desarrollo de los sistemas de medición faltantes

La implementación de sistemas de medición adicionales es esencial para garantizar una cobertura completa de los indicadores seleccionados. Se considera fundamental que los sistemas sean altamente automatizados y cuenten con poka-yokes para asegurar la precisión de los datos.

Inicialmente la atención se centra en la temática de calidad, abordando los KPIs relacionados con:

a. Cajones retornados por desvíos de calidad: Se opta por utilizar una lista de SharePoint como método de registro y base de datos. Se trata de una herramienta informática que permite crear y compartir información en una tabla similar a Excel. Las características que la hacen idónea para este propósito incluyen:

- Fácil uso y comprensión: Diseñada para usuarios con niveles básicos de familiaridad con la informática.
- Ingreso de datos rápido y sencillo: Proporciona un formulario de entrada de datos personalizable.
- Campos obligatorios y personalizados: Garantiza que los registros estén completos antes de ser guardados y permite definir el formato de los datos ingresados.
- Acceso en línea: Permite a los usuarios acceder desde cualquier ubicación mediante una computadora o dispositivo móvil.

Para esta lista se definen cuatro columnas esenciales:

- Fecha de reingreso al almacén: Fecha y hora en la que el cajón es reingresado al almacén después de ser devuelto por la línea de producción.
- Fecha de recepción: Fecha en la que se realizó la recepción e ingreso del cajón en el almacén tras su descarga del camión.
- N.º de artículo: N.º identificador del artículo contenido en el cajón.
- Cantidad de piezas: Cantidad de unidades que contiene el cajón.

b. Cajones mal identificados: Se utiliza nuevamente una lista de SharePoint como base de datos, por las mismas razones mencionadas en el punto anterior. Sin embargo, el método de ingreso de datos requiere un enfoque diferente para manejar la complejidad de la información a registrar. Como ilustra el esquema de la Fig. 2, los errores de

identificación pueden manifestarse tanto en el n.º del artículo como en el código de la colada (cada caso cuenta con sus respectivos datos asociados), por lo que no es posible aplicar el formulario utilizado previamente debido a la imposibilidad de configurar los campos como obligatorios solo bajo circunstancias específicas.



**Figura 2:** Procedimiento para el ingreso de datos de cajones mal identificados

Por esta razón se implementa un formulario de Google, que permite redirigir al usuario a secciones específicas del formulario según las respuestas ingresadas. La información recolectada se almacena automáticamente en la lista de Sharepoint.

Para esta lista se define una columna por cada recuadro amarillo del diagrama de la Fig. 2. A estas se suman las siguientes:

- Fecha: Fecha en que se cometió el error de identificación del cajón.
- Elemento mal identificado: Especifica si el artículo o la colada fue mal identificado.
- Quién lo registró: Operario responsable de cargar el registro en el formulario de Google.
- Estatus: Estado del error, por defecto “No OK” al guardar el registro. Una vez corregido, se requiere actualizar el estatus a “OK”.

c. Cajones procesados en la cabina de deshumidificación: Para este caso se requiere un método de registro y base de datos diferente, dada la complejidad de la información a registrar y el nivel de automatización deseado. Microsoft Excel es seleccionado por su capacidad para realizar operaciones complejas, conectarse con diversas fuentes de información y automatizar tareas recurrentes mediante el uso de macros

(acciones grabadas que se pueden ejecutar según sea necesario). El sistema se desarrolla en tres etapas clave:

- Registro de Cajones: Tres macros personalizadas facilitan el registro del ingreso y salida de cajones. Dos de ellas generan ventanas emergentes para capturar el n.º de legajo del operario (nº identificatorio que poseen todos los empleados de la planta) y el n.º de cartón del cajón, mientras que la tercera macro copia y pega automáticamente la fecha y hora exactas del registro.

Se utilizan lectores de código de barras para ingresar el n.º de legajo y el n.º de cartón, actuando como poka-yoke para evitar errores de los operarios. La información recolectada se integra en una tabla en Excel, permitiendo calcular el tiempo de permanencia de cada cajón en la cabina y determinar el responsable en caso de problemas.

- Registro de T y H: Ocho sensores distribuidos en la cabina realizan mediciones de temperatura y humedad. Una macro específica transfiere los datos del software de sensores a una tabla en Excel, esencial para obtener el promedio de T y H y poder visualizar esta información en el panel de control.
- Registro de Paradas: Dos macros gestionan el registro del motivo y la duración aproximada de las paradas, copiando la fecha, hora y n.º de legajo del operario responsable. Las listas desplegables, que contienen opciones predefinidas para el motivo y la duración de la parada, se utilizan como poka-yokes para asegurar la uniformidad y precisión de la

información. Una tabla en Excel almacena de manera organizada estos datos críticos.

Estas etapas permiten la creación del panel de control de la cabina de deshumidificación, visible en la Fig. 3.

Este panel proporciona una visión clara de la situación operativa, mostrando si las diferentes posiciones están libres u ocupadas, el estatus de los cajones ingresados, el promedio de T y H, y la cantidad de cajones procesados en el turno actual. Los temporizadores, configurados para iniciar la cuenta regresiva desde 35 minutos, cambian de color para indicar el tiempo restante y alertar al operario cuando el cajón está listo para ser retirado. Se incluyen además varios botones funcionales que ejecutan distintas macros. Los botones azules de “DATOS ENTRADA” y “DATOS SALIDA” permiten indicar los datos para el ingreso y salida de cajones, las flechas rojas y verdes de “INGRESO” y “SALIDA” copian los datos ingresados en la tabla de registro, los íconos de escoba ayudan a eliminar datos ingresados incorrectos, y los botones rojos con una cruz cancelan la operación y borran los registros del cajón de la tabla automáticamente. Posteriormente se trabaja en la temática de entrega, es decir, en los KPIs asociados con:

d. Camiones descargados: Para abordar el registro y seguimiento de estos camiones, se diseña un sistema de medición general que también incluye los camiones exportados y despachos, dado que presentan similitudes en su gestión. El desarrollo de este sistema se terceriza a una empresa especializada debido a la imposibilidad de que el área de IT de la compañía asuma la tarea por falta

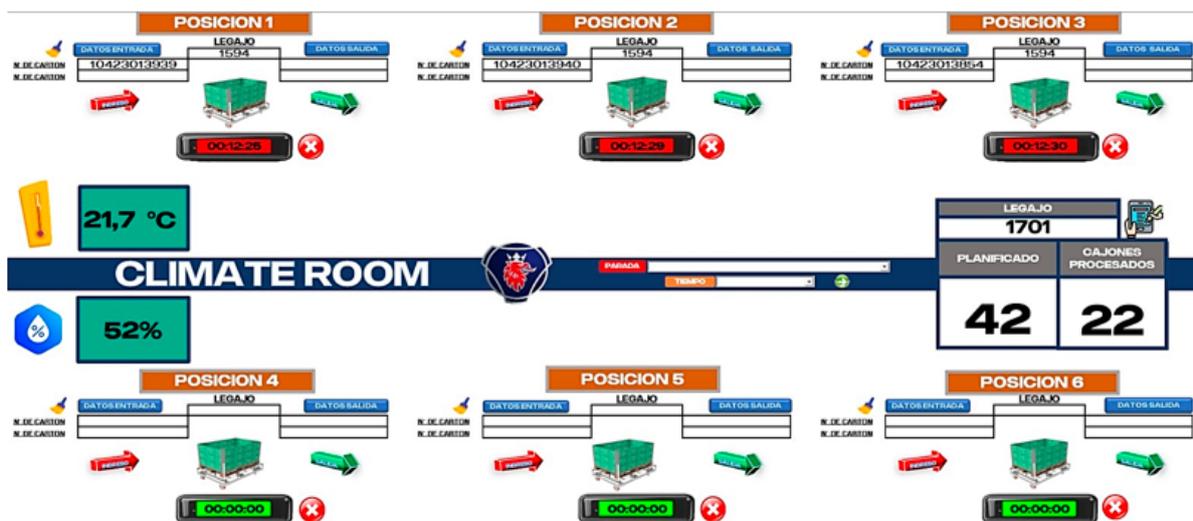


Figura 3: Panel de control de la cabina de deshumidificación

de tiempo y a la necesidad de integrar funciones específicas que permitan afrontar también otro desafío del sector: la aglomeración de camiones en la zona de espera fuera de la planta.

Para poder atacar este último problema, se identifican en primer lugar las causas:

- Falta de documentación de los transportistas: Los transportistas (responsables del transporte de cajones con piezas o embalajes) arriban en ocasiones con la documentación vencida, lo que impide su ingreso a la planta hasta que su empresa de transporte regularice la situación.
- Disponibilidad de operarios para carga/descarga: Durante ciertos momentos del día y la semana, flujos significativos de camiones llegan simultáneamente a la planta, superando la capacidad de los operarios disponibles. Esto provoca que la mayoría deba aguardar en la zona de espera hasta que se desocupe un operario.

Para solucionar la primera causa, se propone garantizar la presentación de la documentación antes de que el transportista llegue a la planta empleando un método virtual. Para ello se decide ampliar las funcionalidades del Sistema Exactian, un software utilizado para el control de documentación de empresas contratistas (encargadas del transporte de químicos, gases, insumos para el comedor, entre otros), permitiendo también el control de documentación de transportistas. Las principales ventajas de esta alternativa son que se cuenta con más tiempo para la verificación de documentos antes de la llegada del camión y que cada empresa transportista puede conocer fácil y rápidamente el estado de la documentación de sus choferes y vehículos.

Para resolver la segunda causa se establece un cronograma diario de carga y descarga de camiones, lo que permite organizar la llegada de los transportistas y evitar picos de flujo vehicular. Esto se consigue mediante la creación e implementación de una agenda de turnos. La empresa tucumana Vortex, especializada en el desarrollo de software, es seleccionada para la ejecución de este proyecto.

El software de gestión de turnos desarrollado permite a los transportistas reservar turnos para carga y descarga, y cuenta con las siguientes características:

- Integración con el Sistema Exactian para verificar el estado de la documentación.
- Adaptabilidad al calendario laboral de la empresa.
- Doble agenda para diferenciar entre carga y descarga.

- Capacidad de reservar turnos solo para la semana actual y la siguiente.
- Flexibilidad para reprogramar turnos.
- Visualización y actualización del estado de los turnos (libre, pendiente, se presentó, no se presentó).
- Registro de usuarios con diferentes permisos (administrador, guardia, transportista).

Este software cuenta con dos sistemas:

- Sistema de Choferes: Destinado a las empresas transportistas y choferes. Permite reservar y gestionar turnos (verifica automáticamente el estado de la documentación), y acceder a información relevante sobre la empresa.
- Sistema de Administración: Utilizado por administradores y guardias. Proporciona un panel de control completo para gestionar y supervisar la asignación de turnos, con capacidades para deshabilitar, cancelar, reservar o validar el cumplimiento de los turnos, además de configurar nuevos horarios y enviar avisos a los transportistas.

Ambos sistemas no solo ayudan a solucionar el problema de aglomeración de camiones afuera de la planta (junto al Sistema Exactian), sino que también funcionan como método de registro para camiones descargados, exportados y despachos. La información generada a partir de la reserva de turnos se recopila en la base de datos de Vortex y se vincula posteriormente con el software utilizado para el tablero de control operativo.

e. Camiones exportados y despachos: Desarrollado en el apartado anterior.

f. Facturas ingresadas y cerradas: Se opta por una solución ágil y directamente asociada a los software previamente desarrollados. Se utiliza un archivo de Excel vinculado a la base de datos de Vortex, lo que posibilita la disposición de información crucial en tablas específicas para cada camión que ingresa y descarga en la planta. Se incluye una columna adicional denominada "Factura ingresada y cerrada" con opciones de "Sí" o "No" para indicar el estado de la factura.

Ciertos datos se obtienen a partir de correos y archivos enviados periódicamente a las diferentes empresas transportistas. Un analista de la oficina de Logística es responsable de completar y mantener actualizadas las tablas, así como de gestionar el estado de las facturas en el software corporativo de la empresa.

### 3.5 Diseño y elaboración del tablero de control operativo

En primera instancia, se determina el software a utilizar. Se elige Power BI por su capacidad de análisis empresarial basada en la nube, que permite unir diversas fuentes de datos y presentar análisis a través de informes y paneles interactivos.

En una segunda fase, se decide fraccionar el tablero de control operativo en dos informes independientes, cada uno publicado por separado y con los KPIs divididos según su origen. Esto se debe a dos razones principales:

- Los datos generados por los sistemas internos de la compañía (Chronos, SAIUS y Zyght) no pueden ser alojados en Power BI Service debido a las políticas de ciberseguridad de la organización.
- Los datos de las listas de Sharepoint no pueden ser publicados en Power BI Report Server debido a limitaciones del sistema.

Tras los trabajos de conexión y configuración de las bases de datos, se procede con el diseño de ambos informes. Se elige una estructura clara y simple, compuesta por una pestaña principal que muestra una visión general de los KPIs más relevantes utilizando luces de colores para indicar el estado actual. Además, se incorporan pestañas secundarias, que proporcionan detalles específicos sobre cada temática, incluyendo gráficos, tablas, contadores y filtros personalizados.

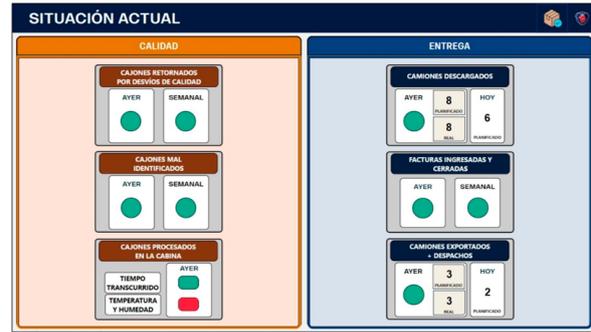


Figura 4: Pestaña principal del informe para Power BI Service

El informe destinado a Power BI Service abarca la mayoría de los KPIs. La Fig. 4 presenta la pestaña principal diseñada para este caso, dividida en dos secciones: calidad y entrega. El color verde de las luces indica que el parámetro se encuentra en situación normal, mientras que el rojo señala alguna anomalía. Si se requieren más detalles, cada temática dispone de su pestaña secundaria a la que se accede haciendo clic en el título correspondiente. La pestaña que contiene los KPIs de calidad se exhibe en la Fig. 5.

El informe destinado a Power BI Report Server guarda similitudes con el anterior. La pestaña principal, para este caso, se compone de tres secciones correspondientes a las temáticas de calidad, entrega y seguridad, como se muestra en la Fig. 6.

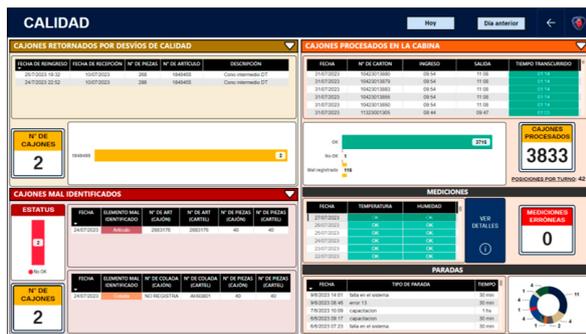


Figura 5: Pestaña de calidad del informe para Power BI Service

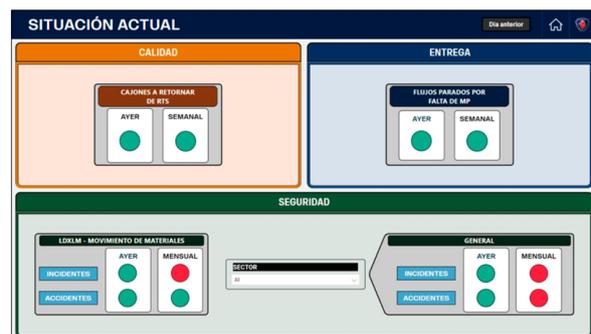


Figura 6: Pestaña principal del informe para Power BI Report Server

Las secciones de calidad y entrega no disponen de pestañas secundarias debido a la cantidad limitada de indicadores. Para compensar, se integra la posibilidad de obtener más detalles de dichas temáticas directamente en la pestaña principal, cliqueando en el título correspondiente. Esto despliega información adicional en el mismo recuadro, como se muestra en la Fig. 7.

El diseño modular de ambos informes permite una fácil ampliación y adaptación a posibles cambios en los indicadores clave o la incorporación de nuevas áreas de interés. Esta estructura flexible garantiza la vigencia y utilidad de los reportes a largo plazo.

## IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE GESTIÓN

### 4.1 Publicación del tablero de control

La publicación de los tableros es esencial para ponerlos a disposición y habilitar el acceso a todas las personas interesadas en utilizarlos.

Como se explicó anteriormente, un informe se publica en Power BI Service, mientras que el otro se lo hace en Power BI Report Server. En ambos casos, es crucial configurar los siguientes aspectos

para garantizar un uso efectivo:

- Acceso a los informes: Se autoriza el acceso exclusivamente a los miembros del sector de Logística y al gerente del departamento de Logística y Calidad. Esto asegura que la información sea accesible únicamente para aquellos que tienen un rol directo en las actividades relacionadas.
- Frecuencia de actualización de los datos: La información se actualiza de forma automática cada 30 minutos, intervalo mínimo permitido por los sistemas utilizados. Esta frecuencia asegura un seguimiento altamente actualizado de las actividades del área, permitiendo una toma de decisiones informada y oportuna.

### 4.2 Capacitación del personal

Con el propósito de conseguir que el personal de la empresa utilice de manera efectiva el nuevo tablero de control operativo, se diseña e implementa un plan de capacitación integral que engloba tanto los informes de Power BI como los diversos sistemas de medición implementados.

Todas las sesiones de capacitación se llevan a cabo de manera presencial, asegurando el tiempo

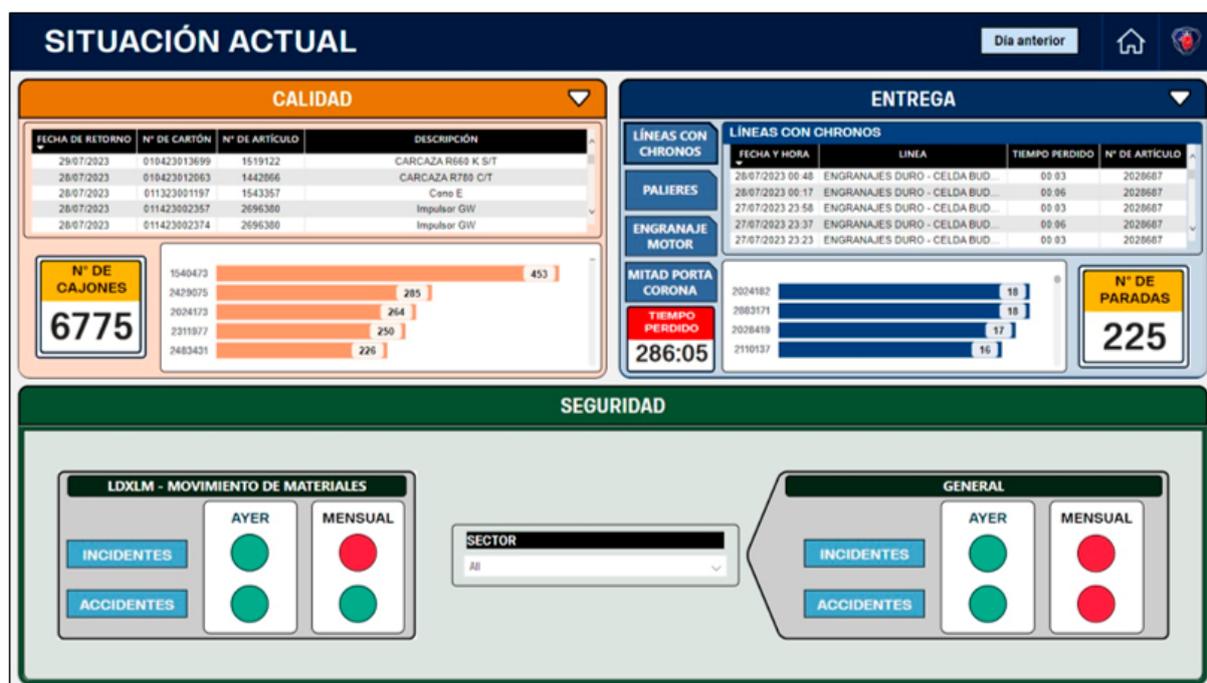


Figura 7: Pestaña principal con información detallada de calidad y entrega

necesario para cubrir todos los aspectos relevantes y abordar las preguntas o consultas que puedan surgir durante el proceso formativo.

Los operarios logísticos son los destinatarios principales del entrenamiento sobre el uso de los diferentes sistemas de medición desarrollados, ya que son los responsables de registrar la mayor parte de la información clave. Dado que el registro preciso de datos constituye la base sobre la cual se erige el tablero de control, resulta sumamente necesario que este proceso se lleve a cabo de manera adecuada, dedicando un tiempo significativo para brindar una instrucción detallada a los distintos trabajadores responsables y enfatizar la relevancia de su tarea.

Posteriormente, se extiende la capacitación a los analistas y líderes del área logística, para que sean capaces de comprender el funcionamiento de cada software y adquirir la capacidad de identificar posibles problemas en su utilización.

En lo que respecta a la capacitación sobre el uso de los informes de Power BI, se comienza instruyendo a los líderes del área, quienes desempeñan un papel central como usuarios principales del tablero de control. Se detallan las diversas funcionalidades y características de los informes elaborados, destacando los beneficios de su implementación. Esto busca garantizar que se aproveche al máximo el uso de la herramienta.

Finalmente, se brinda formación a los operarios del sector con el objetivo de que comprendan la función de los informes y se familiaricen con su uso, facilitando así su seguimiento y comprensión en las reuniones RTM.

#### **4.3 Seguimiento del uso y funcionamiento**

Esta fase del proyecto se enfoca en el monitoreo continuo del uso y desempeño del tablero de control operativo y de los sistemas de medición tras su implementación.

Durante la semana inmediatamente posterior a la puesta en marcha de la herramienta de gestión, se lleva a cabo un análisis completo de la información registrada en las diversas bases de datos y visualizada en los reportes de Power BI. No se identifican inconvenientes significativos en el uso de ninguno de los sistemas, a excepción de algunos errores mínimos, principalmente vinculados al

formato de los datos ingresados, que impedían, en ocasiones, la actualización automática de los informes.

Para abordar eficazmente este problema y evitar su recurrencia, se implementan las modificaciones necesarias tanto en las bases de datos como en los reportes. Luego, se dedica una semana adicional para verificar minuciosamente que todo esté en orden y sin contratiempos.

Una vez confirmado el correcto uso y funcionamiento de la herramienta de gestión, se declara concluido el proyecto, considerándolo satisfactoriamente implementado y listo para ser plenamente utilizado por el personal de la empresa.

## **CONCLUSIONES**

Del desarrollo de este proyecto, cuyo objetivo primordial fue establecer KPIs y configurar un tablero de control operativo en el área de Movimiento de Materiales para impulsar la mejora continua en la gestión logística, se derivan conclusiones sustanciales.

Los indicadores clave de rendimiento identificados y seleccionados se alinean de manera coherente con los objetivos estratégicos de la organización y proporcionan información crucial para evaluar el estado y rendimiento de las operaciones principales del sector. Además, los criterios de medición establecidos aseguran una evaluación efectiva de los KPIs, facilitando la identificación de áreas susceptibles de mejora.

Los sistemas de medición implementados, combinando software internos de la empresa y otros desarrollados específicamente para este proyecto, demuestran ser efectivos al recopilar la información necesaria de manera rápida y práctica. Aquellos sistemas construidos desde cero se caracterizan por contar con una interfaz amigable con el usuario y asegurar la precisión de los datos registrados mediante la implementación de poka-yokes.

El tablero de control operativo, dividido en dos informes independientes, ofrece una visualización dinámica y actualizada de

los diversos indicadores. Su diseño flexible proporciona la capacidad de expandirse o incorporar nuevos KPIs y temáticas en el futuro, garantizando su relevancia y utilidad a largo plazo.

La implementación de este proyecto contribuye significativamente a mejorar la eficiencia en los procesos logísticos, elevar la calidad del servicio y reducir desperdicios asociados a las tareas del sector. La supervisión en tiempo real de las actividades permite una toma de decisiones más ágil y fundamentada, abordando las deficiencias actuales y estableciendo los cimientos para una gestión más eficiente.

En resumen, la culminación exitosa de este proyecto refleja un avance notable hacia una gestión logística más eficaz y orientada a la mejora continua. La combinación de KPIs estratégicamente seleccionados, sistemas de medición eficientes y un tablero de control operativo adaptable ubica a la empresa en una posición óptima para enfrentar los desafíos logísticos con agilidad y eficacia.

## REFERENCIAS

Ayestarán Crespo, R., Rangel Pérez, C., & Morillas, A. S. (2012). Planificación estratégica y gestión de la publicidad: conectando con el consumidor. ESIC.

Ballvé, A. (2001). Tablero de control: Organizando información para crear valor. Ediciones Macchi, 2000.

Deming, W. E. (1986). Out of the Crisis. Massachusetts Institute of Technology.

Parmenter, D. (2015). Key Performance Indicators: Developing, Implementing, and Using Winning KPIs (3ra edición). John Wiley & Sons.

Shewhart, W. A. (1939). Statistical method from the viewpoint of quality control. Graduate School of the Department of Agriculture.

Shingo, S. (1986). Zero Quality Control: Source Inspection and the Poka-Yoke System. Productivity Press.

## RESTAURACIÓN Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL CABILDO DE SALTA: ANÁLISIS DOCUMENTAL Y TÉCNICO DE UNA OBRA EMBLEMÁTICA

*Echazú Lamas, Silvina<sup>1</sup>; Muñoz, Ivana<sup>1</sup>; Gil, Natalia<sup>1</sup>; Unzueta Perez, Jorge<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta*

\* *sechazu@hotmail.com, oroscolia@gmail.com*

**RESUMEN:** El presente trabajo investiga la evolución arquitectónica del Cabildo de Salta, destacando su importancia histórica desde el siglo XVIII. Su estudio revela nuevas perspectivas sobre su construcción original y posteriores modificaciones, la relevancia de su restauración para la preservación del patrimonio cultural y la seguridad estructural.

El hito en la historia de este edificio se produce en 1936, una oportuna intervención del Diputado Carlos Serrey, quien impulsó la expropiación por el Estado Nacional según ley N° 12345 y recuperó el edificio para su posterior restauración.

El estudio aborda la evolución arquitectónica del Cabildo de Salta y la necesidad de clarificar su estado actual. Para la realización de este estudio se llevó a cabo una revisión exhaustiva de documentos históricos en archivos locales y nacionales y técnicos, incluyendo análisis de materiales mediante técnicas avanzadas de caracterización como Termografía infrarroja, ensayo de Esclerometría y teoría de muros mixtos.

Los resultados obtenidos proporcionan una comprensión más profunda de la estructura y materiales del Cabildo, y permiten modelar sus propiedades mecánicas para evaluar su respuesta frente a una acción según las normativas vigentes (Parte I -INPRES CIRSOC 103).

**Palabras claves:** Cabildo de Salta, materiales, edificios históricos.

**ABSTRACT:** This study explores the architectural evolution of the Cabildo of Salta, emphasizing its historical importance since the 18th century. It discusses new perspectives on its original construction and subsequent modifications, emphasizing the relevance of its restoration for the preservation of its cultural heritage and structural safety.

A milestone in the history of this building takes place in 1936, with the intervention of Deputy Carlos Serrey, who promoted the expropriation of the town hall by the National State according to law No. 12345 and its recovery for subsequent restoration.

The research focuses on the architectural evolution of the Cabildo of Salta and the need to address its current state. To do this, a review of historical and technical documents in local and national archives was required, including analysis of materials using advanced characterization techniques such as Infrared Thermography, Sclerometer tests and the theory of mixed walls.

The results obtained provide an understanding of the structure and materials of the Cabildo and allow modelling its mechanical properties in order to evaluate its response to seismic activity (Part I-INPRES CIRSOC 103).

In conclusion, this study contributes to the conservation and proper management of its cultural heritage, fundamental to the identity and collective memory of the city.

**Keywords:** Cabildo of Salta, materials, historic buildings.

### ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El 16 de abril de 1582 fue fundada la ciudad de Salta por el representante del Virrey el Licenciado Don Hernando de Lerma, acatando las normativas establecidas por la corona española, se destinó una cuadra para casas del cabildo y cárcel frente a la plaza. Su estructura y composición fue de una gran simplicidad, su arquitectura estaba organizada en base a patios que respondían a un orden jerárquico. Por la documentación existente se puede inferir que hasta 1663, existió una casa del cabildo de dos plantas, que sufrió continuas reparaciones (Fig. 1a)).

En 1789 se inició una reforma de consideración, fundamentalmente en el frente, por cuanto se construyó la recova con los pórticos con arcadas de mampostería, se colocaron los techos de tejas, se construyó el balcón cuyas ménsulas están talladas con figuras antropomorfas, agregándose además

las barandas de hierro de planta alta. Se colocaron lajas en las veredas y se construyó una nueva escalera para subir a planta alta, interviniendo en las obras el Arquitecto y Alarife Felipe González, el Maestro Herrero Don José Marzan y Montes y el carpintero Francisco Torán. Se inauguró en noviembre de 1789 con motivo de la coronación del Rey Carlos IV.

En 1797, ante la necesidad de colocar en lugar visible el reloj público que se había sacado de la Iglesia de la Compañía de Jesús, se construyó la torre del cabildo. La misma mantiene una estructura independiente, adosándose a los muros interiores de una habitación. La altura estuvo condicionada por la sugerencia del relojero, Don José de Yanzi. La construcción independiente de la torre explica que no se encuentre perfectamente centrada con respecto al eje de simetría del edificio.

A través de los años, funcionó como Casa de

Gobierno, Cárcel, y Policía de la provincia hasta 1880. Durante el gobierno del Dr. Martín Güemes, fue vendido en pública subasta según ley provincial N°59 del 14 de marzo de 1889, con el fin de construir la nueva Casa de Gobierno respondiendo a su visión más europeizante negando todo aquello que recordara los tiempos de la colonia (Fig.1b).

El edificio fue ocupado por inquilinos, locales de negocios, hotel y viviendas. Este fenómeno de cambio de funciones, totalmente distintas y solo con sentido utilitario, fue muy común en la época y muchos de los deterioros se realizaron en ese momento.

En los primeros años del siglo XX se demolió el ángulo noroeste del cabildo para la construcción de una vivienda en planta alta y local comercial en planta baja; perdiéndose con ello la Sala Capitular (Buschiazzo, 1946), de tal modo que de los diecisiete arcos que tenía en la galería de planta baja y diecinueve en la planta alta, sólo quedaron catorce y quince, respectivamente (Fig.1c)

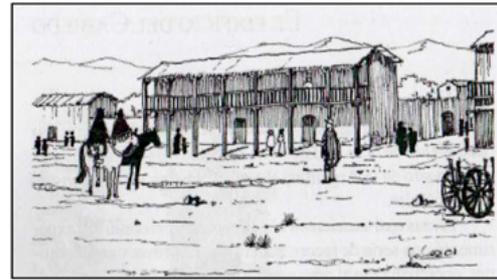
A pesar de todas las adversidades experimentadas, el edificio del cabildo de la ciudad de Salta es el que más completo se ha conservado en la Argentina y constituye una verdadera joya arquitectónica. (Gómez, 2010)

En 1936, una oportuna intervención del Diputado Carlos Serrey, impulsó para que fuera expropiado por el Estado Nacional según ley N° 12345 y recuperado para su posterior restauración.

### 1.1 Restauraciones desde 1942 hasta la fecha

Los trabajos comenzaron a cargo de la Dirección Nacional de Arquitectura, bajo la dirección del arquitecto Mario Buschiazzo a partir de 1942.

Sobre la base de un Plano que localizó en el Archivo de la Administración Nacional del Agua, inicia sus tareas publicando sus fuentes en el boletín N°8 de la Comisión Nacional de Museos y Monumentos Históricos.



a) Cabildo de Salta hacia el siglo XVII



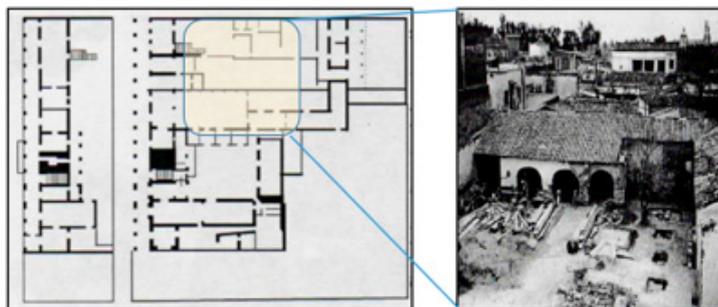
b) Fines del Siglo XIX



c) Siglo XX

Figura 1: El Cabildo a través de los siglos

Realizó un plano de relevamiento, efectuando cateos en los muros y cimientos, a fin de detectar la mayor información posible (Buschiazzo, 1941) (Fig.2a)). Obtiene que el patio mayor estaba rodeado por corredores y al momento de la restauración habían desaparecido, conservándose solo tres arcos y el resto de los cimientos de los pilares (Fig.2b)). El tamaño del papel es A4. Se den respetar los siguientes márgenes: superior 5 cm, izquierdo 3 cm, derecho 3 cm e inferior 3 cm.



a) Planta baja y alta, antes de la restauración. Año 1942

b) Vista del sector sur del patio

Figura 2: Documentación del Archivo de la Administración del Agua

De los cateos realizados distingue en la construcción del edificio histórico el empleo de muros de adobe, ladrillo y rocas en las diversas épocas. “Los espesores de muros varían de una sección a otra, y se notan disimetrías y falta de coincidencia de paredes que delatan distintas etapas...” (Buschiazzo, 1943) (Fig.3a)).

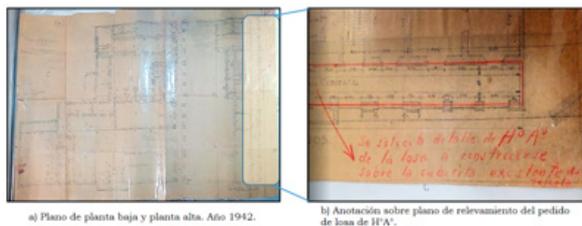
La mayor parte de los techos fueron levantados y reemplazadas las maderas que estaban en malas condiciones, efectuándose luego el retechado, respetando las técnicas originales.

El techo de la galería superior fue reemplazado por una losa de hormigón armado con vigas invertidas, dejando por debajo, las tejas y tirantes de madera como un encofrado perdido, para conservar su aspecto original.

De igual manera los entresijos de planta alta, fueron consolidados disponiéndose una losa de hormigón armado entre el cielorraso de tablonos de madera y las baldosas cerámicas (Fig.3b).

totalidad, de color amarillo-crema y las puertas verdes inglés, como la mayoría de los monumentos históricos restaurados en esa época.

De esta manera, el edificio cuya restauración terminó en 1949, fue destinado a albergar el Museo Histórico del Norte (Fig. 4.4a) y Fig.4.4b)).



**Figura 3:** Documentación del Archivo de la Administración del Agua

Los vanos que habían sido abiertos con posterioridad fueron cerrados con ladrillos nuevos recurriendo a muros dobles con un hueco entre medio, para lograr los espesores originales.

Los muros fueron pintados exteriormente, en su



a) Antes de la restauración. Año 1942



b) Después de la restauración. Año 1949

**Figura 4:** Vista del Cabildo (Antes y después de la restauración 1942-1949)

## 1.2 Restauración 2021

En el año 2021, en conmemoración al Bicentenario del Fallecimiento del Gral. Güemes, se realizaron tareas de mantenimiento para la puesta en valor del Museo Histórico del Norte, con fondos de la O.E.I Organización de Estado Iberoamericana para la Educación la Ciencia y la Cultura, gestionados por el Ministerio de Cultura de la Nación. La misma se realizó bajo la supervisión de la Dirección de Infraestructura Mantenimiento y Servicios dependiente del Ministerio de Cultura de la Nación.

Las reparaciones consistieron en remoción y ejecución de revoques, pintura, sellado de fisuras, reparación de grietas y preparación de la superficie para la pintura a la cal, tanto en muros interiores como exteriores (Fig. 5).

## MATERIALES

### 2.1 Descripción general

En el año 2021 coincidiendo con la etapa de restauración por el Bicentenario del Fallecimiento del Gral. Güemes, se procedió al recorrido del edificio histórico por los diferentes espacios, donde se pudo observar la coexistencia de materiales y

espesores.

La roca explotada para la construcción en la época colonial hasta las primeras décadas del siglo XX fue la cuarcita, obtenida del cerro San Bernardo. En la edificación de la torre se usó inicialmente, sin embargo, por dificultades económicas, se continuó con adobe y concluyó en ladrillo macizo (Gómez, 2010).

El empleo del ladrillo predomina en los arcos de las recovas y en los muros, alcanzando un espesor promedio de 0,65 metros.

El entrepiso entre planta baja y planta alta conformado por vigas de madera y entablonado, se reforzó añadiendo una losa de hormigón armado con vigas invertidas armada en dos direcciones; se vinculó y ocultó en los gruesos muros y se cubrió con una carpeta y solado de baldosas criollas en el plano superior y tablonos de madera en el inferior. Esta misma solución se llevó a cabo para materializar la losa de la galería que conforma la planta alta.

La estructura del techo a dos aguas que cubre los restantes espacios son cabreadas de madera, alfajías, tejuelas y tejas coloniales, en otros locales, se materializó una variante de la cubierta a partir del empleo de cañizo, torta de barro y tejas coloniales. (Herr, 2020)

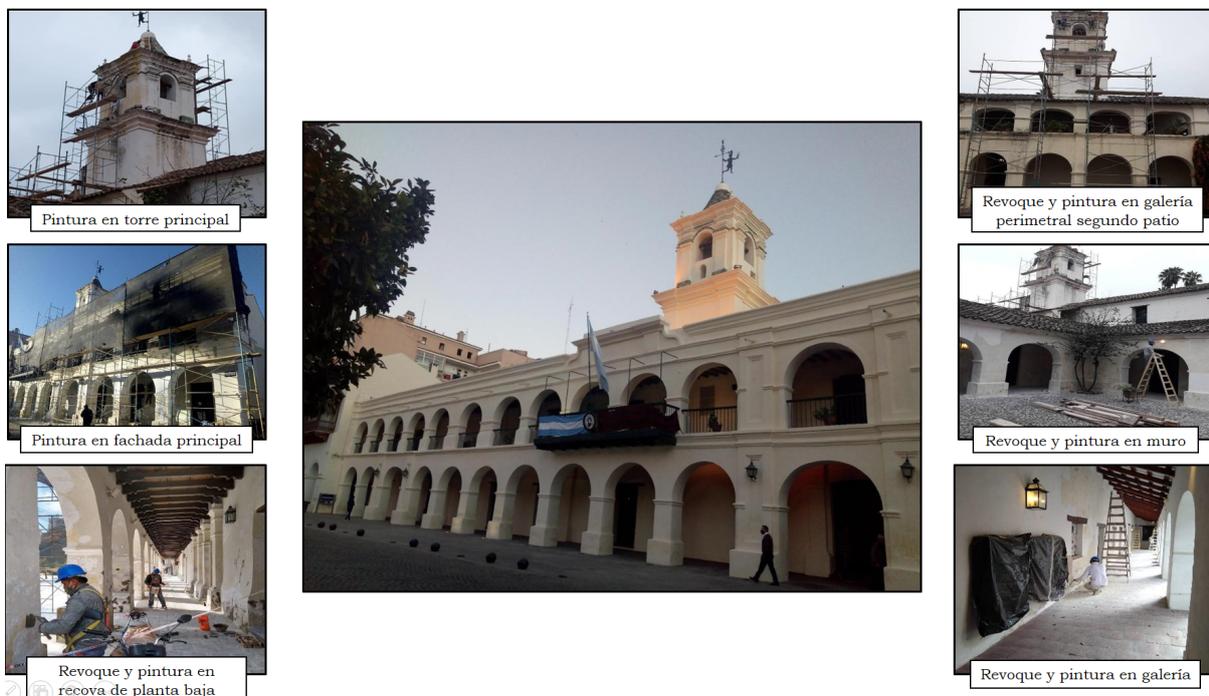


Figura 5: Vistas parciales de los diferentes sectores de Remodelación 2021

## 2.2 Características de los materiales

A continuación, se definen el origen, propiedades mecánicas, usos y otras propiedades de los siguientes materiales (Tabla 1).

**Tabla 1:** Características de los materiales

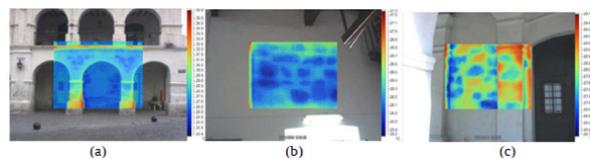
MATERIALES	ORIGEN	PROPIEDADES MECANICAS	OTRAS PROPIEDADES	USOS	IMAGEN
ARTIFICIALES	ADOBE	Sus resistencias a la compresión son bajas (de 3 a 5 Kg. por cm <sup>2</sup> ) cuando está seco y pueden considerarse nulas a los esfuerzos de tracción. Peso específico: 17 Kn/m <sup>3</sup>	Es un material higroscópico pues tiene la capacidad de mantener el calor o el frío, su coeficiente de conductividad varía entre 0,46 y 0,81 W/m.K, por esta razón puede asimilarse a un material aislante. Son resistentes al fuego.	Empleado en albañilería.	
	LADRILLO	Es una pieza tipo cerámica o arcilla cocida, moldeada en forma de paralelepípedo rectangular	Es un material de alta resistencia y aislante, tanto acústico como térmico. Es un material ignífugo y su nivel de absorción de agua alcanza aproximadamente el 13-15%	Empleado en albañilería.	
NATURALES	MADERA	La resistencia a tensión para la dirección de las fibras es de 100 a 120 kg/cm <sup>2</sup> , mientras que, normal a las fibras, la resistencia a tensión es tan baja que suele despreciarse en los cálculos. La resistencia a compresión en la dirección de las fibras es menor que en tensión (de 80 a 100 kg/cm <sup>2</sup> ). Normal a las fibras se encuentra entre 15 y 30 kg/cm <sup>2</sup> . El peso específico varía entre 600 y 1000 kg/m <sup>3</sup> .	Es un material no homogéneo y combustible. Es anisótropo sus propiedades mecánicas cambian en función de la dirección en que se aplique la carga.	Las maderas duras y semiduras: se emplean en carpintería general y de obra, construcciones civiles, navales, hidráulicas, vigas, columnas, pilotes, etc.	
	ROCA-CUARCITA	Cerro San Bernardo	Posee elevada resistencia a la compresión y baja resistencia a tracción; se considera que la resistencia a tracción esta entre 1/10 y 1/20 de la resistencia a compresión. El peso específico: 2,69 Kn/m <sup>3</sup>	Es un buen aislante. No absorbe la humedad. Tiene grandes propiedades en cuanto aislamiento acústico	Revestimientos, albañilería.

## 2.3 Termografía infrarroja

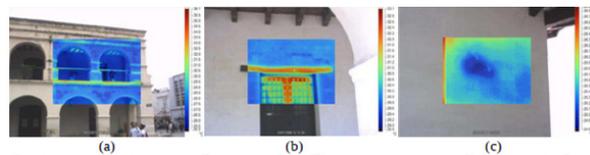
Es una técnica de reconocimiento no destructiva, se usa también como herramienta para el estudio e identificación de sistemas constructivos empleados en edificios históricos.

La transferencia de calor (energía) en un sistema constructivo que separa dos ambientes, uno exterior y otro interior que se encuentran a distinta temperatura, lo hacen mediante tres formas básicas: conducción, convección y radiación. Así, todos los cuerpos transmiten energía en forma de radiación, y puesto que cada objeto se encuentra a El informe “Termografía infrarroja aplicada al Cabildo de Salta” fue realizado por el equipo de científicos de INENCO, UNSa – CONICET y el Instituto de Artes Americano e Investigaciones Estéticas “Mario J. Buschiazzo” (IAA) – Facultad de Arquitectura, Arte y Urbanismos – Universidad de Buenos Aires.

En la fachada del Cabildo se aprecia la presencia de roca en la fachada (Fig.6) y en los muros presentando diferentes tipos de materiales (Fig. 7).



**Figura 6:** Documentación del Archivo de la Administración del Agua



**Figura 7:** Documentación del Archivo de la Administración del Agua

## 2.4 Esclerometría

El ensayo se basa en la Norma Iram 1694, para determinar la dureza superficial de los elementos, utilizando el martillo de Schmidt que impulsa con una determinada energía una masa conocida y que, al golpear la superficie del material, rebota. Se deben seleccionar superficies planas donde apoya el esclerómetro de forma perpendicular a las mismas.

La cantidad de energía recuperada, que es proporcionada por un mecanismo de resorte, es un índice de la dureza superficial que consideramos como valor del número de golpes o de rebote.

Procedimiento del Ensayo in Situ:

1. Primero, se determina la zona donde realizar el ensayo.
2. Ubicada la zona de trabajo, se procede a pulir y limpiar las paredes, para que no afecten en los números que proporciona el martillo de Schmidt.
3. Antes de ensayar, se seleccionó los puntos en la piedra, ladrillo y mortero sobre un área de 1 m<sup>2</sup> y se elaboró una planilla.
4. Por último, se coloca el martillo de Schmidt en forma perpendicular al plano del punto seleccionado, y se toma nota del mismo.

En el siguiente esquema de planta baja y alta se ubican las zonas de ensayos (Fig.8):

En planta baja se tomó 20 (veinte) zonas de ensayos, en la que en cada punto se hicieron 9 (nueve) mediciones, en planta alta se tomó 23 (veintitrés) zonas, siendo el mismo caso de 9 (nueve) mediciones en cada punto. Se obtuvo en cada uno el Valor medio, la desviación estándar y el grado de uniformidad.

En planta baja, el valor medio promedio y el grado de uniformidad promedio de todos los puntos fue:  
Valor Medio promedio

$$V_m = \frac{\sum V_i}{n} = \frac{790}{20} = 39.52 \sim 40 \quad (1)$$

Grado de uniformidad promedio:

$$\delta = \frac{s}{V_m} = 0.04 \quad (2)$$

En planta alta, el valor medio promedio y el grado de uniformidad promedio de todos los puntos fue:

$$V_m = \frac{\sum V_i}{n} = \frac{535}{23} = 23.27 \quad (3)$$

Grado de uniformidad promedio:

$$\delta = \frac{s}{V_m} = 0.11 \quad (4)$$

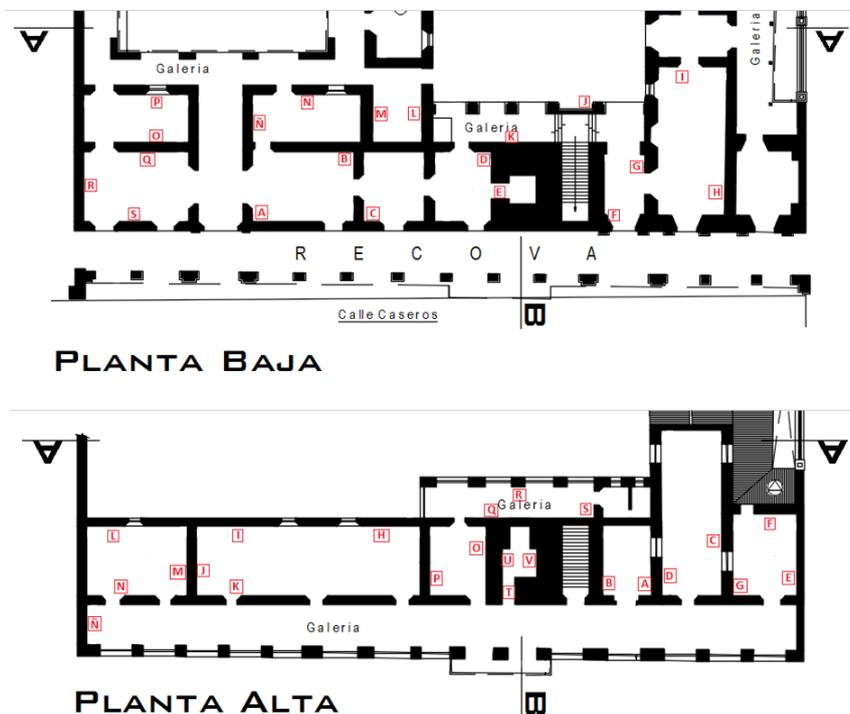


Figura 8: Planos de planta baja y alta del Cabildo

De acuerdo a los resultados y el grado de uniformidad promedio de la resistencia de los materiales, se concluye que el arreglo en la composición de la mampostería es organizada según los materiales respetando diversas alturas. Teniendo en cuenta Vm (valor medio) obtenido del ensayo de esclerometría y en función de la inclinación del martillo, luego se emplea el abaco de Schmidt, donde desde el eje de abscisas y hasta alcanzar el valor de la densidad de la roca, se traza una línea horizontal hasta cortar el eje de las ordenadas, obteniendo el valor de la resistencia a compresión simple.

En planta baja, el valor de resistencia a compresión simple de la cuarcita:

$$\sigma_{cuarcita} = 86 \text{ Mpa} = 86000 \text{ Kn/m}^2$$

En planta alta, se emplea el valor de resistencia a compresión simple del ladrillo determinado en V.2:

$$\sigma_{ladrillo} = 12000 \text{ Kn/m}^2$$

### 2.6 Muros mixtos

En base a los ensayos no destructivos, se determinaron las configuraciones de modelos de muro a utilizar, distinguiendo tres tipos, según el porcentaje de incidencia de los materiales que lo conforman.

Se presenta un esquema tipo de los muros a emplear (Fig. 9):

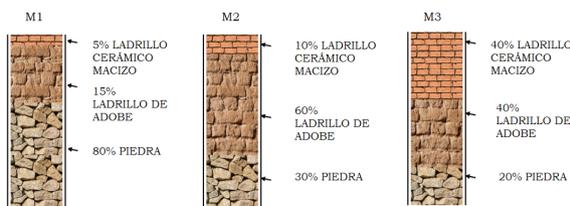


Figura 9: Modelo de muros

A continuación se detalla:

#### 1. Determinación de Pesos específicos

Tabla 2: PE M1

M1			
MATERIAL	%	PE	Total
Piedra	80	28	22.4
Adobe	15	17	2.55
Lad. macizo	5	13	0.65
Peso E. de Mampos. KN/m <sup>3</sup>			25.6

Tabla 3: PE M2

M2			
MATERIAL	%	PE	Total
Piedra	30	28	8.40
Adobe	60	17	10.20
Lad. macizo	10	13	1.30
Peso E. de Mampos. KN/m <sup>3</sup>			19.90

Tabla 4: PE M3

M3			
MATERIAL	%	PE	Total
Piedra	20	28	5.60
Adobe	40	17	6.80
Lad. macizo	40	13	5.20
Peso E. de Mampos. KN/m <sup>3</sup>			17.6

2. Determinación de Resistencia a la compresión  
Para la determinación de la compresión del muro se propuso la una fórmula Essgener, donde se afecta tanto a la resistencia del ladrillo o piedra como a la resistencia del mortero:

$$\sigma_{muro} = \frac{1}{3} \sigma_{material} + \frac{2}{3} \sigma_{mortero} \quad (5)$$

Las resistencias a la compresión de los materiales y morteros lo tenemos de la siguiente Tabla 5:

Tabla 5: Resistencia de los materiales

Resistencia de compresión KN/m	
Roca	sc=86000
Ladrillo	sc=12000
Adobe	sc=1200
Mortero	sc=5670

Para la resistencia a compresión del ladrillo se tuvo en cuenta el reglamento INPRES-CIRSOC 103- Parte III (2006).

A partir de la resistencia a compresión de ladrillo y una relación de número de rebotes entre mortero y ladrillo, se obtiene la resistencia del mortero.

Tabla 6: Resistencia de los muros mixtos

$\sigma_{M2} = \frac{1}{60} \sigma_{LM} + \frac{3}{60} \sigma_a + \frac{16}{60} \sigma_p + \frac{2}{60} \sigma_m$	4060
$\sigma_{M1} = \frac{1}{30} \sigma_{LM} + \frac{6}{30} \sigma_a + \frac{3}{30} \sigma_p + \frac{2}{30} \sigma_m$	4160
$\sigma_{M3} = \frac{2}{15} \sigma_{LM} + \frac{2}{15} \sigma_a + \frac{1}{15} \sigma_p + \frac{2}{30} \sigma_m$	5100

### 3. Resistencia a la tracción

La resistencia a tracción de la mampostería depende, principalmente, de la adherencia entre el mortero y la piedra o ladrillo. Como la fuerza de adherencia es prácticamente despreciable, se ha considerado siempre, para fines de cálculo, que la resistencia a tracción de la mampostería es nula, aunque puede alcanzar valores distintos del cero. Se puede considerar una resistencia a la tracción para la mampostería igual a un 10% de la resistencia a la compresión.

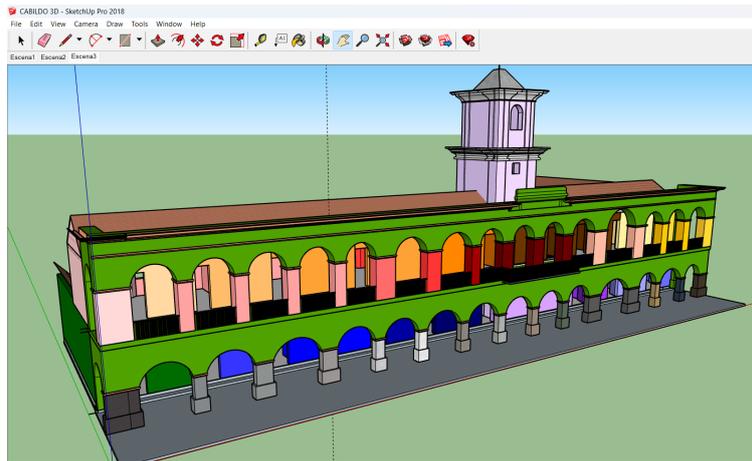
## MODELACION NUMERICA

Esta técnica consiste en discretizar la estructura por medio de elementos con un comportamiento no lineal, que toma en consideración la baja resistencia a tracción del material y la progresiva degradación de rigidez. Es recomendable para

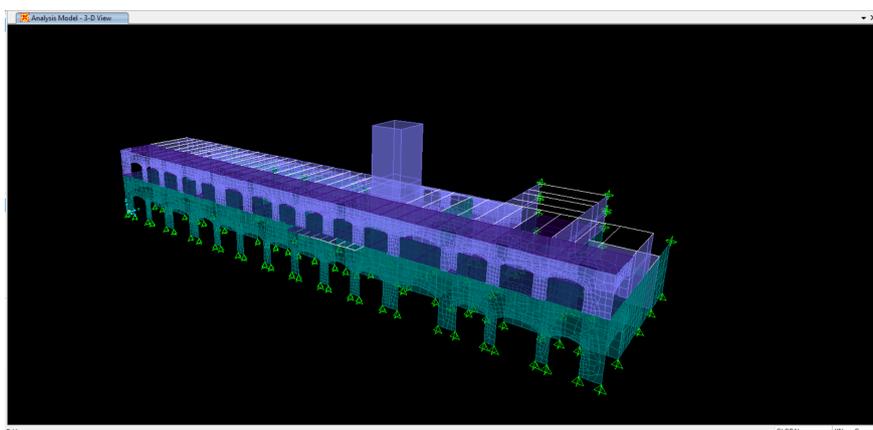
el análisis estructural de casos con geometrías complejas y propiedades de materiales a calibrar. (Gea, 2017).

Para los edificios históricos es necesario conocer la respuesta esperada en término de tensiones, desplazamientos, y deformaciones ante las diferentes acciones a las que se encuentra sometidos.

Para el modelado de la estructura del Cabildo se usaron los programas SketchUp (Fig. 10) y SAP2000 v.20.2.0-2018; en el programa de elementos finitos se ingresaron las dimensiones, propiedades mecánicas de los materiales y las cargas, y se procedió al mallado de la estructura cuidando las condiciones de borde entre muro-entrepiso, muro-cubierta y vinculaciones entre muros, asegurando dicho comportamiento y obteniendo en forma precisa los resultados (Fig.11).



**Figura 10:** Modelado de Cabildo en SketchUp



**Figura 11:** Modelado de Cabildo en SAP2000

Cada uno de estos modos, tiene asociado un período, que se relaciona a una aceleración a través del espectro de diseño, estas aceleraciones afectan la masa en función de la matriz de masas sísmicas, que son combinados en una respuesta única que corresponderá con la respuesta sísmica de la estructura. Existen varias formas de realizar la combinación de los modos de vibración, pueden ser obtenidas mediante el método CQC (combinación cuadrática completa), el método SRSS (raíz cuadra de la suma de los cuadrados), el método ABS (suma de los valores absolutos), estas resultan de considerar los efectos de cada modo de vibración.

El tipo de combinación que recomienda la norma (CIRSOC 103-2018 Parte I, Cap.7.2.4), es el procedimiento de superposición cuadrática completa (CQC). Si los períodos de los modos a superponer están separados más del 10% del valor sucesivo se puede aplicar la superposición cuadrática simple (SSRS).

Para el Cabildo, el espectro de diseño se obtiene teniendo en cuenta el tipo de zona sísmica, tipo de suelo, categoría de ocupación y el factor de reducción R, los datos son:

- Zona sísmica (CIRSOC 103-2018 Parte I, Cap.2.2): 3

De la clasificación del sitio de emplazamiento (CIRSOC 103-2018 Parte I, Cap.2.3) y teniendo en cuenta la Velocidad media de la onda de corte  $V_{sm} = 30$  m/s (Orosco, 2020) se obtiene:

- Tipo espectral: Tipo 3;
- Sitio: SE suelo cohesivo blando de baja plasticidad.
- Sitio: SE suelo cohesivo blando de baja plasticidad
- De la clasificación según destino y funciones (CIRSOC 103-2018 Parte I, Cap.2.4):
- Grupo A;  $\gamma = 1.3$ .
- El factor de reducción R toma en cuenta el comportamiento en estado último de la construcción en su conjunto para la determinación de las acciones sísmicas de diseño.
- La norma (CIRSOC 103-2018 Parte I, Cap.5.1), establece los factores de reducción para el tipo estructural correspondiente a los elementos sismorresistentes. Por lo tanto:
- $R = 1.5$ ;  $C_d = 2$

### 3.4 Combinación de estados

Las combinaciones de carga que incluyen el efecto sísmico se definen en las siguientes expresiones, :

- 1.4 D
- 1.2 D +1.6 L
- 1.2 D +/- SISMX+0.5 L
- 1.2 D +/- SISMY+0.5 L
- 0.9D +/- SISMX
- 0.9D +/- SISMY

### 3.5 Análisis de resultados

Los resultados de tensiones arrojados por el programa se presentan la Figura 12.

Se observó que:

- En la dirección X (SISMO X), el muro más afectado es el muro denominado: MURO A que está compuesto de las tipologías de muro 2 (planta baja) y muro 3 (planta alta)
- En la dirección Y (SISMO Y) el muro afectado es el MURO B compuesto por la tipología de muro 3 (planta baja).

En la Fig. 13 se muestra el croquis del cabildo con la ubicación de cada uno de los muros analizados.

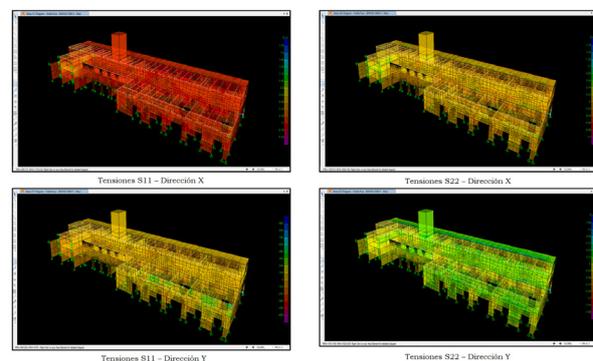


Figura 12: Tensiones obtenidas en direcciones X y Y

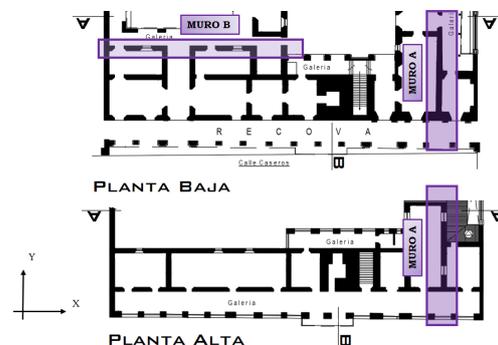


Figura 13: Ubicación de los muros AyB

1. Tensiones

De acuerdo a las tipologías de los muros los determinada en Tabla 6., se verifican las tensiones máximas obtenidas en el análisis en los muros con los valores de las resistencias admisibles de los diferentes tipos de muros(Tabla7).

Tabla 7: Tensiones admisibles de M2y M3

KN/m <sup>2</sup>	
Muro2	$\sigma_c=4160$
M2	$\sigma_t=416$
Muro3	$\sigma_c=5100$
M3	$\sigma_c=510$

A continuación se detallan los valores de las tensiones obtenidas en los muros A y B. (Tabla 8 y 9).

Tabla 8: Tensiones S11 y S22-Muro A

		S11		S22	
		Comp.	Tracción	Comp.	Tracción
S- X	M2	-38	86	-233	374
	M3	0	434	-47	384
S- Y	M2	-34	0	-175	0
	M3	-15	79	-82	267

Tabla 9: Tensiones S11 y S22-Muro B

		S11		S22	
		Comp	Tracc.	Comp	Tracc.
S-X	M2	-166	411	-545	122
S- Y	M2	-60	359	214	321

Los muros, tienen una resistencia muy baja a esfuerzos de tracción, motivo por el cual las primeras grietas se presentan en zonas donde estas se concentran en:

- Esquinas de puertas y ventanas.
- La conexión de paredes perpendiculares, debido a que estas por efectos del sismo quieren separarse, por falta de elemento de confinamiento.
- Grietas horizontales que se forman en las aristas libres de paredes que concurren con otras perpendiculares.
- Fallas por compresión en las zonas más bajas de los muros.

De las Tabla 8 y Tabla 9 se infiere que:

Para el MURO A, las tensiones S11 y S22 son menores a las tensiones teóricas de tracción y compresión.

Para el MURO B, donde las tensiones S11 y S22 no sobrepasan la resistencia teórica de la mampostería.

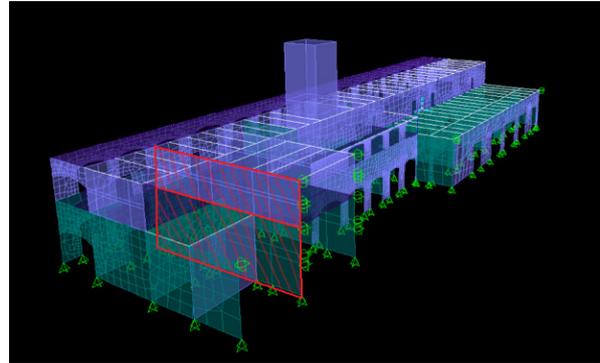


Figura 14: Tensiones en el Muro A

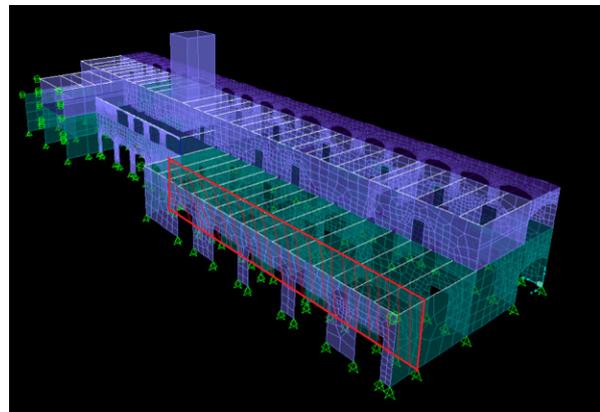


Figura 15: Tensiones en el Muro B

2. Desplazamientos

Por otra parte, realizaron los análisis correspondientes a los deslizamientos con criterio similar a las tensiones, observando que los máximos desplazamientos se producen los Muros.

3.6 Conclusiones

- El estudio de los antecedentes históricos y técnicos permitieron entender las distintas etapas de remodelación de la obra. Siendo la de mayor trascendencia las del año 1942-1949 a cargo del Arq. Buschiazzo.
- De la inspección realizada durante el recorrido por el edificio, se logró reconocer en distintos sectores cada uno de los componentes que conforman la mampostería colonial mixta compuesta por diferentes materiales (adobe, ladrillos y rocas)
- Las resistencias a la compresión obtenidas de los muros, rondan en valores de 4060 Kn/

- m<sup>2</sup> a 5100 Kn/m<sup>2</sup>, valores que se consideran aceptables considerando las características y la incidencia de cada uno de sus componentes.
- Por otra parte, en base a la documentación obtenida se pudo modelar la estructura de forma más exacta, teniendo en cuenta la presencia de contrapiso de hormigón en el entrepiso, losa en el techo de galería de planta alta, lo que permitió realizar un análisis no lineal, para ver el comportamiento del edificio histórico.
  - El análisis modal espectral realizado en su estado actual mostro que la estructura del Cabildo es capaz de resistir con cierto margen de seguridad a una sollicitación sísmica propia de la zona donde se encuentra ubicado (Zona 3), representada por el espectro de diseño correspondiente. Por lo que no se considera necesario una propuesta de refuerzos ya que aún con los sismos propuestos, se esperan daños leves localizados.
  - Con lo que respecta al suelo, las reacciones en los puntos de apoyo de los muros en el mismo satisfacen los valores admisibles calculados con un factor de seguridad igual a 1.36. Por lo que no es necesario intervenir en las fundaciones.
  - En el análisis de tensiones, el Muro A en la dirección en X y el Muro B en la dirección Y no sobrepasan las tensiones de tracción y de compresión.
  - Del análisis de resistencia frente a sollicitaciones perpendiculares al plano del muro, se observan que estos son menores al valor de Momento de referencia propuesto, es decir que ambos verifican.
  - los máximos desplazamientos provocados por la sollicitación sísmica en ambas direcciones, que el registrado en la dirección “y” es mayor del de la dirección “x”. Esto se debe a la diferencia de longitudes entre los muros, y a su unificación con muros adyacentes, los que colaboran a soportar la acción del sismo perpendicular al muro afectado.
  - La mayor concentración de tensiones de compresión se localiza en los encuentros de los muros con los muros perpendiculares; y de tracción en los sectores medios de dichos muros. También se muestran concentraciones de tensiones de tracción en la zona de contacto con otros muros lo cual podría deberse a la falta

de continuidad.

- El mantenimiento de este edificio es sistemático y continuo utilizando las mejores técnicas de preservación como también la aplicación de los avances tecnológicos.
- Por otra parte, para adecuar la edificación a las normativas actuales y mejorar la funcionalidad, se han actualizado las instalaciones eléctricas, de plomería y de seguridad, siempre procurando minimizar el impacto visual. Así mismo, se han instalado pantallas audiovisuales para una interacción didáctica en la guía sobre el museo.

## REFERENCIAS

Archivos y Biblioteca Históricas de la Provincia de Salta: materiales audiovisuales. Salta, Argentina.

Barbat, A. H., & Pujades, L. (2004). Evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona. Sísmica 2004 – 6° Congreso Nacional de Sismología e Engenharia Sísmica.

Buschiazzo (1941,1943). Informe del Arquitecto adscrito Señor Mario Buschiazzo sobre los Monumentos Históricas de la Provincia de Salta y Jujuy. Boletín de la Comisión Nacional de Museos y Monumentos Históricas N°3. Buenos Aires, Argentina.

Buschiazzo (1946). “Los Cabildos del Río de la Plata”. Boletín de la Comisión Nacional de Museos y Monumentos Históricas N°8. Buenos Aires, Argentina.

Caicedo C., Barbat A.H., Canas J.A., Aguilar R. (1994) Vulnerabilidad sísmica de edificios. Monografías de ingeniería sísmica (CIMNE IS-6 1994), Centro internacional de métodos numéricos en ingeniería.

Caro R. y Ceballos M., Diseño y Construcción Sismorresistente de Edificios de Mampostería, Hormigón Armado II, Agosto 2001, Salta.

CEDIAP. Centro de Documentación e Investigación de la Arquitectura Pública.

De la Cuesta, M. (1971). “El Cabildo de Salta

- (1582-1825)". Universidad Católica de Salta. Tesis. Salta, Argentina.
- Flores Larsen, S., Herr, C., Gónzales, S., Gea, C. (2019). "Termografía infrarroja aplicada al Cabildo de Salta. Un primer paso hacia la rehabilitación energética de edificios históricos". IBPSA 2019. Mendoza, Argentina.
- Gea, Demergassi, Toledo, Gea (2011). Patrimonio histórico: una propuesta metodológica para su conservación en entornos urbanos cambiantes y sitios de peligrosidad sísmica. 2do. Congreso Iberoamericano y X Jornada "Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio". La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Gea, S. B. (2017). Vulnerabilidad Sísmica de Edificios Históricos de Mampostería. Salta.
- Gómez, R.M. (2010). El Cabildo de Salta. Editorial Hanne. Salta, Argentina.
- Gómez, R.M. (2014). El neocolonial en Salta: o la construcción del imaginario. Fondo Editorial Secretaria de Cultura de la Provincia de Salta. Salta, Argentina.
- Herrera, I., Vielma C., Beneit L. (2014). Metodologías de evaluación de vulnerabilidad sísmica de edificios. Monografía CIMNE IS-68.
- Meli, R. (1998), Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos. Fundación ICA, México.
- NAVARRO (2012). INPRES: "Sismicidad Histórica de la R.A.". Argentina.
- Orosco, Haarala, Bianco, Aguilera (2020). Vs30 A partir del periodo fundamental de suelos en la Ciudad de Salta, 15° E-ICES. Universidad de Cuyo, Mendoza, Argentina.
- Pernaut, C. Arquitectura colonial 1-2-3. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Argentina.
- CIRSOC 101 (2005). Normas Argentinas para las construcciones Sismorresistentes.
- Reglamento INPRES-CIRSOC 103 (2018).
- Normas Argentinas para las construcciones sismorresistentes, Parte 1 y Parte 3.
- SAFINA, S. (2002). Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales-Análisis de su contribución al riesgo sísmico. Tesis Dr. Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. ETSECCPB.
- Waisman, M. (1977). "La estructura histórica del entorno", Editorial Escala, Bogotá.
- UNISDR. (2009). Terminology on Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland: ISDR United Nations International Strategy for Disaster Reduction.

## ILUMINACIÓN EN VIVIENDA RURAL SOCIAL Y OBSERVANCIA DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

*Rigali, Silvina<sup>1</sup>; Ferreira, Alejandro<sup>1</sup>; Juárez, Carlos<sup>1</sup>; Fernández, Franco<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

ITA - Instituto de Tecnologías Aplicadas

\* silvinarigali@yahoo.com.ar; af552000@gmail.com; jucarlosram@gmail.com; francofer@hotmail.com

**RESUMEN:** Este trabajo analiza la iluminación en viviendas rurales del programa social de erradicación de ranchos en Santiago del Estero y propone alternativas eficientes considerando una inversión ajustada por la naturaleza y amplitud del proyecto. Se encuadra la propuesta como un aporte a la mitigación del cambio climático, y una contribución al cumplimiento de los ODS, al mejorar la calidad de vida, y reducir el consumo de energía eléctrica convencional. Para seleccionar la alternativa óptima se procede a reproducir las condiciones de la vivienda, e instalar sistemas de iluminación combinando fuentes y luminarias, y consecutivamente registrar los niveles de iluminancia en grilla, calculando los demás parámetros. Este estudio se realiza para 220 V CA, y para 12 V CD.

La luminaria tipo campana de aluminio grande y lámpara LED 14W cálida, satisface los requerimientos de eficiencia y confort visual para CA. Para 12 V, CD, se exponen las ventajas de emplear la misma luminaria con LED 18 W frente a lámpara desnuda. La herramienta utilizada para calcular tCO<sub>2</sub>eq es el factor de emisión de la red eléctrica, con el cual se determina una disminución de 773 tCO<sub>2</sub> anuales con la sustitución de LFC por LED para 27.000 viviendas alimentadas por red convencional.

**Palabras claves:** Vivienda rural, sostenibilidad, iluminación eficiente.

**ABSTRACT:** This paper analyzes the lighting in rural homes of the social program for the eradication of precarious adobe houses in Santiago del Estero and proposes efficient alternatives considering an investment adjusted by the nature and breadth of the project. The proposal is framed as a contribution to the mitigation of climate change, and a contribution to the fulfillment of the SDGs, by improving the quality of life, and reducing the consumption of conventional electricity. To select the optimal alternative, the conditions of the house are reproduced, and lighting systems are installed by combining sources and luminaires, and consecutively the illuminance levels are recorded in the grid, calculating the other parameters. This study is performed for 220 V AC, and for 12 V DC.

The large aluminum bell lighting fixture and 14W warm LED lamp meet the efficiency and visual comfort requirements for AC. For 12 V, DC, the advantages of using the same luminaire with 18 W LED compared to a bare lamp are exposed. The tool used to calculate tCO<sub>2</sub>eq is the electricity grid emission factor, which determines a reduction of 773 tCO<sub>2</sub> per year with the replacement of CFLs with LEDs for 27,000 homes powered by conventional grids.

**Keywords:** Rural housing, sustainability, lighting efficiency.

### INTRODUCCIÓN

En las viviendas de la República Argentina (RA), el consumo de energía eléctrica (EE) destinado a la iluminación se estima entre un 25% y 35% según información del Ministerio de Economía en la página oficial (2022). Existe un enorme potencial de ahorro en este sector que debe aprovecharse sin menoscabo de la calidad, ya que una iluminación inadecuada afecta la productividad, el confort visual, la seguridad y también tiene efectos sobre el estado de ánimo de las personas. Por tanto, se deben alcanzar parámetros apropiados en el interior de las viviendas, acordes con consumos eficientes que mitiguen la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

El trabajo presenta una propuesta basada en la calidad en iluminación de una vivienda rural, y una estimación del potencial de reducción de GEI en las 27.000 unidades construidas con acceso a redes de energía eléctrica en la provincia de Santiago del Estero (SDE).

La variante propuesta es reemplazar la lámpara desnuda empleada de forma masiva en hogares rurales (incandescente halógena o fluorescente compacta -LFC-) por el conjunto LED + luminaria del tipo campana, lo que permitirá proveer a los usuarios de una iluminación de mejor calidad. Antecedentes a este trabajo tales como Kirshbaum et al (2008) muestran los resultados de la sustitución de tecnología incandescente por LFC y la utilización de artefactos de tipo campana hace más de una década.

Además del reemplazo de lámparas, y utilización de una sencilla luminaria, entre las innovaciones introducidas sin exceder costos, se recomienda para el futuro instalar proyectores LED 20W con sensores de movimiento para activar la iluminación solo cuando sea necesario, especialmente útil en áreas exteriores por seguridad. Otras alternativas que ya se aplican con éxito en el territorio nacional en edificios públicos, buscan promover la arquitectura bioclimática, aprovechando la luz natural mediante un diseño que maximice

la entrada de luz solar, incluyendo ventanas estratégicamente ubicadas, tragaluces y techos transparentes.

Además de una tecnología eficiente, se requiere un uso responsable. La capacitación comunitaria, mediante la implementación de programas de eficiencia energética en comunidades rurales, busca empoderar a los residentes con conocimientos sobre cómo optimizar el uso de la iluminación y otros recursos. Aunque es bien sabido que los habitantes del interior tienden a observar prácticas más eficientes en el uso de recursos naturales como el agua, el gas envasado, la leña, porque su experiencia en la adversidad climática, y precariedad de sus viviendas les ha mostrado la finitud de estos recursos no renovables. La implementación de estas prácticas no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también puede conducir a un ahorro significativo de costos a largo plazo para los residentes de viviendas rurales que en la actual desregulación de las tarifas impactará de forma positiva.

La investigación desde la universidad pública busca la fusión entre ciencia, universidad y territorio mediante la generación, difusión y aplicación de conocimiento técnico-científico, compartiendo la experiencia teórica y analítica con la mirada del poblador rural con sus hábitos, su idiosincrasia, y sus problemáticas.

Es necesario aportarle a este trabajo la información sobre el proyecto nacional que estaba en progreso y fue ejecutado por diferentes actores dependientes del gobierno de la nación, iniciado en mayo de 2023, denominado “Proyecto de eficiencia energética y energía renovables en la vivienda social argentina”. Y especialmente al PRONEV, “Programa nacional de etiquetado de viviendas”, que es un programa de triple impacto: ambiental, social, y económico. El impacto social está relacionado con mejorar la calidad de vida de quien habita una vivienda energéticamente eficiente, contribuir a desarrollar el nuevo paradigma de la energía, y de esta manera crear muchos puestos de trabajo en la transición.

## ANTECEDENTES Y CONTEXTO

### 2.1 El escenario catastrófico debido al CC

La problemática actual del cambio climático (CC) conduce a escenarios catastróficos sino se actúa de inmediato, pero existe un convencimiento mundial entre los expertos, que aún hay tiempo de alcanzar escenarios deseados si globalmente se enfocan los

esfuerzos para mitigar las emisiones de dióxido de carbono que provocan este desequilibrio en la atmósfera con la consecuencia del calentamiento climático, y sus efectos extremos asociados, algunos de los cuales ya se padecen en diferentes regiones del mundo, generando graves problemas tales como lluvias intensas (e inundaciones), sequías extremas (que agigantan y catalizan los incendios forestales), olas de calor, y olas de frío extremo, entre otros. Y estas acciones deberían desplegarse paralelamente a políticas públicas orientadas a la adaptación al CC de las comunidades vulnerables.

Si pudiera detenerse hoy la emisión de GEI, aun así, habría que manejar los efectos adversos del CC, porque llevaría años revertir los procesos, y recuperar el equilibrio de la biósfera. Por eso desde los gobiernos de 193 países más la unión europea alineados en tratados internacionales vinculantes se plantea la descarbonización hasta el año 2050, buscando modificar la situación en forma progresiva y continua, mientras se hacen esfuerzos para construir ciudades y comunidades sostenibles y resilientes de manera de minimizar en prospectiva el número de refugiados climáticos. Desde 1994 la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMUNCC) fundamentó a través de su panel de científicos que estos sucesos eran consecuencia natural de la intervención humana (un fenómeno antropógeno) en el planeta. Asociado mayormente a la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo, la explotación agrícola ganadera intensiva que genera grandes cantidades de metano y otros gases, y sumado al derroche en el uso de los recursos naturales: energía, agua, minerales, etc. Agravado por una población que crece en promedio el 1,8% anual, y debido a una cultura de consumo desmedida promovida durante décadas, que tiene además como consecuencia la generación de residuos promedio de 1,7kg/día por habitante.

La huella de carbono (o huella ecológica) medida en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO<sub>2</sub>eq) marca los patrones de consumo y desecho de los individuos, las comunidades, los negocios, y las naciones, y ha demostrado rigurosamente que se sobre utiliza el capital natural del planeta por más del 25% según muchos estudios y entre ellos el reporte bienal de Argentina ante la CMUNCC (2015).

## 2.2 No hay futuro predeterminado: hay futuros posibles

La prospectiva no es predicción ni pronóstico, ya que al aplicar el concepto de tecnologías de análisis futuros (TFA), basado en creatividad, métodos descriptivos y matrices, métodos estadísticos, opinión de especialistas, monitoreos y sistemas de inteligencia, modelamiento y simulación, escenarios, análisis de tendencias, evaluación y decisión/acción, juegos de actores, da cuenta que es un proceso mucho más complejo según explica Beinstein, (2016) en el “Manual de Prospectiva”. La metodología de “Escenarios”, brinda posibles vías de futuro, muestra que el propósito general no es predecir el estado futuro del sistema más probable, sino evaluar la factibilidad y deseabilidad de los diferentes escenarios. El concepto clave es que no hay un futuro predeterminado, hay futuros posibles. Lo importante es definir las fuerzas impulsoras (drivers) y barreras que pueden llevar al futuro, tanto las tendencias visibles hoy como las rupturas inimaginables según Mari, (2021). Siguiendo con Mari (2021) existen tres aspectos fundamentales: “...el diagnóstico: mirar al pasado: la dinámica que ha llevado al momento presente, la extrapolación de tendencias: cómo sería el futuro si todo siguiera igual, la cuestión: ¿es el escenario tendencial el más probable? Los futuros alternativos: determinados por los factores de cambio (drivers)”.

Teniendo en cuenta estos conceptos, un ejemplo es la determinación de los posibles escenarios climáticos que mediante estudios de variables atmosféricas realizan los científicos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), con diagnóstico de más de 30 años, información de los parámetros en el presente, y extrapolación de tendencias con modelos de simulación climática en supercomputadoras, allí además se van incorporar los factores de ruptura o cambio de la tendencia, que podría ser detener la emisión de GEI (carbono neutralidad 2050), u otras innovaciones tecnológicas que modificaran el porcentaje de CO<sub>2</sub>, y esto genera diferentes escenarios, unos catastróficos otros deseables (sobre los últimos se trabaja armando políticas públicas, estrategia de mitigación y adaptación, etc.).

## 2.3 Metas planteadas en la Argentina

Dentro del plan de acción que el gobierno nacional llevaba a cabo (hasta diciembre de 2023) en el cumplimiento de las metas planteadas para 2030,

la iluminación sostenible, es un sector donde se apuesta a lograr una importante remisión de GEI en función de los diseños eficientes, nuevas tecnologías y aplicación de mantenimiento preventivo.

La Argentina comienza su camino de compromisos en esta problemática en 1994 cuando adhiere por ley nacional 24.295 a la CMNUCC, y además en la reforma constitucional en ese mismo año se incorpora el concepto de desarrollo sostenible en el artículo 41. Posteriormente ratifica el Protocolo de Kioto no como miembro sino como país parte, con responsabilidades comunes pero diferenciadas, y años después se aprueba el Acuerdo de París bajo la CMNUCC mediante la ley 27.270/16. Éste establece que todos los países parte deben presentar y actualizar periódicamente sus contribuciones nacionalmente determinadas (NDC).

La meta absoluta establecida en la NDC de “no exceder la emisión neta de 483 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO<sub>2</sub>eq) en el año 2030” (ver fig. 1), fue asumida mediante un proceso de validación y consenso gubernamental, jurisdiccional y con el involucramiento de diversos sectores de la sociedad. El cumplimiento de esta meta se logrará mediante la implementación de una serie de medidas de mitigación a lo largo de la economía focalizando en los sectores de energía, agricultura, bosques, transporte, industria y residuos. La ley 27.520/19 de “Presupuestos mínimos para la adaptación y mitigación al CC” configura otro instrumento para impulsar las políticas públicas. El marco para la acción de largo plazo (ELP) 2021 se correlaciona con el propuesto para el “Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático” (PNAMCC), y es un instrumento de política nacional, conjuntamente sigue el camino marcado en la Segunda NDC.

La transformación del sistema energético hacia un futuro de carbono neutralidad en la Argentina, según el ELP (2021) “debe ser justa, asequible y sostenible, y debe tener simultáneamente consistencia social, económica, fiscal, y financiera”, porque incluye cambios tecnológicos y modificaciones tanto en la forma en la que se genera energía, como en hábitos y comportamientos arraigados por el uso del recurso. La transición debe fortalecer las capacidades de desarrollo del país, por lo cual se dará a través de un sendero progresivo de adquisición de competencias tecno productivas fundamentadas en la complementariedad estratégica de capacidades

y recursos propios.

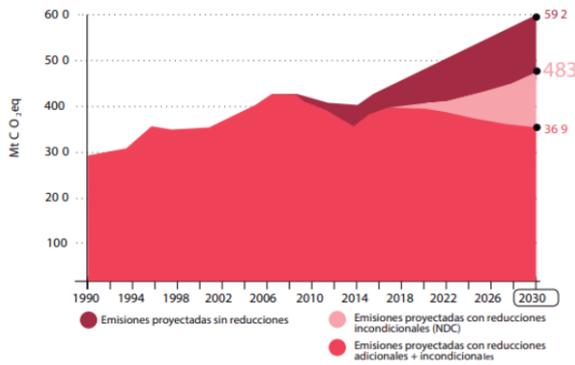


Figura 1: Meta de mitigación. Fuente: Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al CC

Propender a ofrecer iluminación de calidad junto a otros servicios incluidos en la vivienda social rural (calefones solares, por ejemplo), es aportar a la temática más amplia del abordaje del Cambio Climático desde la mitigación de GEI mediante eficiencia energética.

## 2.4. Vivienda digna y ODS

El Estado al proveer la vivienda social rural contribuye al cumplimiento de algunos de los ODS que instan a lograr la igualdad y la dignidad de las personas, el nro. 7: garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos; el nro. 11: lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles; el nro. 12: garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles; y el nro. 13: adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos extremos son metas posibles.

En el Objetivo 7, ONU (2015) la meta 7.3 refiere: “De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética”. Es un desafío que compromete a todos, pero hace especialmente responsables a los gobiernos.

En este camino de pensar la transición se requiere analizar la matriz eléctrica de Argentina actual, con generación térmica 52,33 %, hidráulica mayor a 50MW 27,34 %, renovables 11,74 % (Leyes 26.190 y 27.191), 8,52 % nuclear, e importación 0,05% los datos de CAMMESA (2024) se muestran en la figura 2, y aún no se aproximan a las metas planteadas en el “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica” Ley 27.191/15, reglamentada por el decreto N°531/16 de energías renovables, que exigía que

cada sujeto con cierto consumo está obligado a alcanzar la incorporación mínima del ocho por ciento (8%) del total del consumo propio de energía eléctrica, con energía proveniente de las fuentes renovables, al 31/12/2017, e ir incrementando ésta hasta el 31/12/2025, donde deberán alcanzar como mínimo el veinte por ciento (20%) del total del consumo propio de energía eléctrica. Se debe especificar que el 11,74% de aporte renovables lo constituyen eólica, solar e hidráulica menor a 50MW.

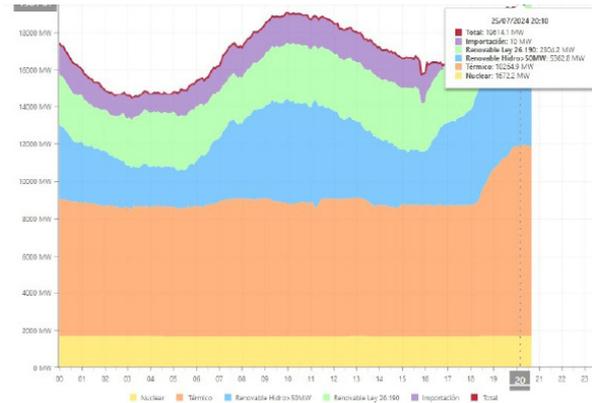


Figura 2: Demanda actual 24/07/2024 de energía total generada e importada. Fuente CAMMESA

La eficiencia energética constituye la mejor y más limpia herramienta para disminuir los gases de efecto invernadero. Debido a que, ahorrando energía eléctrica, se evita emitir toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera, y esto es posible diseñando sistemas eficientes, utilizando luminarias y fuentes de calidad, explotando y manteniendo las instalaciones de iluminación aplicando programas enmarcados en un contexto de planeamiento sostenible, según Raitelli et al (2008) y Rosenfeld (2007).

## METODOLOGÍA

### 3.1 Premisas adoptadas y herramientas utilizadas

Con el objeto de cuantificar la hipótesis que la vivienda social construida en Santiago del Estero se presenta como una oportunidad para reducir emisiones de GEI, mediante la instalación de fuentes y luminarias eficientes, deberán analizarse diferentes conjuntos lámpara+luminaria para dos situaciones: alimentación con 220V CA, y 12V DC.

Antes de comenzar los registros se procede a hacer la lectura de los niveles de tensión de red

convencional de 220V CA empleando una pinza amperométrica marca Fluke modelo 325 400A, y se verifica en la batería utilizada los 12V CD con multímetro digital auto rango marca Brinna premium compacto. Las mediciones de iluminancia horizontal se determinan con un luxómetro marca Lutron modelo LM-8000, bajo norma ISO-9001, en el ambiente cocina-comedor de la vivienda social, realizando la medición para cada conjunto lámpara+luminaria, y lámpara desnuda, siguiendo las recomendaciones de la Norma IRAM AADL J 20-06 iluminación artificial de interiores, y realizando registros de iluminancia en cuadrícula sobre plano de trabajo. La justificación de la adopción de esta metodología está relacionada a las actividades que se llevan a cabo en el área del comedor de una vivienda social que suman en algunas oportunidades las tareas escolares, y labores domésticas como la costura a mano, y el planchado. Por eso la iluminancia se registra sobre plano de trabajo a 0,85 cm del piso, y el criterio aplicado se relaciona a la cantidad de luz requerida para esas tareas.

En la elección del conjunto óptimo luminaria+lámpara se tendrá en cuenta la eficiencia, el nivel de iluminancia, la uniformidad y el confort visual. Con respecto a este último además de considerar el deslumbramiento, se aplicará el modelo de Arie Andries Kruithof, quien mediante experimentos psicofísicos determinó curvas que describen las condiciones de iluminación en la zona delimitada de modo empírico, como agradables y cómodas y, por el contrario, las que están fuera de esta zona, se consideran incómodas, desagradables o no naturales.

Una vez escogido el conjunto óptimo luminaria+lámpara desde el punto de vista de la eficiencia y el confort visual se procede a calcular el potencial ahorro anual de energía en MWh, y en toneladas equivalentes de dióxido de carbono [tCO<sub>2</sub>eq], la cual es una unidad de energía muy usada, computada si se contrasta este consumo hipotético, con el registro actual, teniendo en cuenta el uso (habitual) de lámparas desnudas incandescentes de 75W y LFC 15W en las 27.000 viviendas consideradas.

La estimación del factor de emisión de Argentina se realizará de acuerdo con la "Tool to calculate the emission factor for an electricity system". Versión 7 de las Naciones Unidas. La información utilizada proviene de la "Ex Secretaría de Energía, Subsecretaría de Planeamiento Energético, Dirección Nacional de Escenarios y Evaluación de Proyectos. Dirección de Información Energética",

Tecnología de la Información. Fecha de creación 15/03/23.

La herramienta utilizada para la estimación del factor de emisión de la red se puede aplicar para estimar el MO (margen de operación), BM (margen de construcción) y / o CM (margen combinado) para calcular las emisiones de línea base para un proyecto que sustituye a la energía generada en la red eléctrica que es donde el proyecto suministra electricidad o un proyecto genera ahorros de electricidad, que hubiese sido proporcionada por la red (por ejemplo, proyectos de eficiencia energética del lado de la demanda). En este caso usando datos del año 2019, debería emplearse un factor de emisión de 0,4071 tCO<sub>2</sub>/MWh, que a la fecha debido a las modificaciones de la matriz eléctrica podría ser menor. Este factor de emisión se multiplica por la energía ahorrada en MWh (A), y de esa expresión se obtiene la energía expresada en tCO<sub>2</sub>eq (B) como se aprecia en la ecuación (1).

$$B[tCO_2eq] = 0,4071 \left[ \frac{tCO_2}{MWh} \right] \times A[MWh] \quad (1)$$

### 3.2 Etapas del procedimiento

- Selección de fuentes y luminarias para tomar los registros. Se trabaja con LED 6W clara de filamento cálida, LED 9W cálida, LED 9W fría, LED 14W cálida, LED 14W fría, Globo LED 18W cálida, fluorescente compacta 15W cálida, todas ellas ensayadas con tensión de red, y por último utilizamos la LED 18W DC alimentada mediante una batería para sistemas tecnológicos basados en energías renovables del tipo gel sellada. Las luminarias son tipo campana de aluminio en dos tamaños, símil campana de plástico y lámpara desnuda.
- Armado y conexión de los distintos conjuntos lámpara -campana.
- Medición de tensión de red eléctrica con pinza amperométrica. Y verificación de voltaje en la batería.
- Registros de iluminancia en comedor de vivienda social/rural.
- Fotografías de la luminaria y/o lámpara desnuda, y otros elementos del equipo empleados para tomar los registros.
- Diseño de las tablas comparativas
- Selección de la alternativa óptima
- Cálculo de la remisión anual de GEI por vivienda individual, y teniendo en cuenta el consumo en toda la vivienda, y las unidades construidas durante los últimos 13 años.

## RESULTADOS

### 4.1 Análisis de parámetros de iluminación con alimentación de red 220V

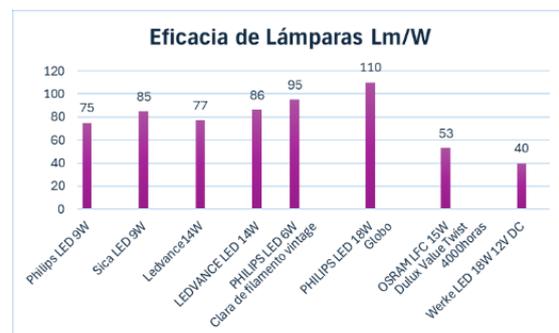
En Tabla I se muestran las lámparas utilizadas, y sus características nominales: eficacia luminosa [Lum/W], temperatura de color en Kelvin, y vida útil aproximada publicada por los fabricantes teniendo en cuenta un número de ciclos de encendido. Las fotografías de las lámparas nos muestran la diversidad de fuentes en el mercado actual. Se ha escogido entre las primeras marcas comerciales, diferentes modelos y potencias para analizar su comportamiento, teniendo en cuenta al tratarse de tecnología LED, el brillo (deslumbramiento) que se produce con una lámpara clara, puede ser un problema a la hora de recomendarla, más allá de su alta eficacia. El confort visual debe ser evaluado correctamente. El índice de reproducción de color para las lámparas LED de este tipo varía entre  $80 \leq IRC \leq 90$ , y la lámpara fluorescente compacta de 15W, tiene un  $IRC \leq 80$ . Las incandescentes con su espectro continuo de radiación, imitan a la luz natural en cuanto al rendimiento de color con un  $IRC=100$ . En la tabla I se muestra una lámpara incandescente de 75W de uso residencial general y cuya fabricación y comercialización fue prohibida por la Ley 26.473 en todo el territorio de la República Argentina desde 31/12/2010. Posteriormente la Ley 27.492/2018, “Prohibición de importación y comercialización de lámparas incandescentes y halógenas”, amplía esta proscripción para las incandescentes halógenas que contemplan el doble de vida útil (2000h) y una mejora no significativa de eficacia 15-18Lm/W. En la actualidad pueden adquirirse en el mercado informal provenientes de países limítrofes, y por estas razones, adoptamos el criterio de trabajar sólo con los valores nominales y realizar un cálculo estimado.

En la figura 3 se observa un diagrama de barras con la prestación de cada fuente, según datos publicados por los fabricantes, estos niveles deberían conjugarse con la apertura de haz de alguna de ellas el caso la Philips LED Globo de 18W posee una apertura de  $200^\circ$  lo que lo hace muy atractivo para algunas combinaciones de luminaria y fuente, y las de marca Ledvance de 14W, que tienen  $140^\circ$  de apertura, un ángulo que favorece el uso de una luminaria tipo campana. En el diagrama de barras solo se muestra la eficacia en condiciones estándar para cada lámpara, el flujo

luminoso entregado por cada vatio consumido, sin considerar su respuesta al ser instalada en el ambiente en combinación con un artefacto. Y otras cuestiones inherentes a la eficiencia y al confort visual.

**Tabla 1:** Características de las lámparas utilizadas para en los diferentes arreglos luminaria/lampara

Fuente	Imagen	Temp. de color	Eficacia Lum/W
Philips LED 9W		3000K	75
15.000 horas		cálida	
Sica LED 9W		6400K	8
25.000 horas		fría	
Ledvance LED 14W		3000K	77
25.000 horas		cálida	
Ledvance LED 14W		6500K	86
25.000 horas		fría	
Philips LED 6W		3000K	95
Clara de filamento		cálida	
15.000 h			
Philips LED 18W		3000°K	110
Globo		cálida	
25.000 horas			
Osram LFC 15W		2700K	53
Dulux		cálida	
4000 horas			
Tungsran incandesce		2700K	12
75W		cálida	
1000 horas			
Werke LED 18W 12V DC		6400K	40
15.000 horas		fría	



**Figura 3:** Gráfico de Eficacia de lámparas construido según datos tabla 1

En la figura 4 se exhibe las dos luminarias tipo campana de aluminio, empleadas para analizar las condiciones de iluminación, con 7 tipos de lámparas en CA y 1 en DC.



Figura 4: Luminaria tipo campana de aluminio en tamaño grande y pequeño

Las diferencias de los artefactos seleccionados pueden observarse en la figura que antecede, la campana de aluminio grande posee un acabado menos especular debido a su uso previo, tiene un diámetro de 44 cm y una altura de 25cm. La campana pequeña (nueva) de acabado especular posee un diámetro de 30cm y una altura de 10cm. Al emplear diferentes combinaciones con fuentes de variadas potencias y formatos, el resultado es interesante porque en algunos casos el apantallamiento de la lámpara produce la disminución del deslumbramiento directo y mejora el confort visual.

Los niveles de iluminancia y uniformidad para luminaria tipo campana grande, se exhiben en la tabla II. En todos los casos (para todas las luminarias) las mediciones se hicieron sobre plano de trabajo a 85cm del piso, y el centro fotométrico de la luminaria o lámpara desnuda se estimó (medición aprox.) 92cm desde el plano de trabajo, ya que la luminaria colgante se instaló a 63cm desde el cielorraso. Para establecer la grilla de medición se debe conocer el número de puntos mínimos representativos, para ello primero se calcula el índice de local k que describe el comportamiento geométrico del local en base a su altura, ancho y largo (cocina-comedor), y obtenido éste se aplica la ecuación (2).

$$N = [k + 2]^2 \tag{2}$$

Tabla 2: Registros de E y cálculo de uniformidad para fuentes con campana grande

Fuente	E [Lux]	G <sub>1</sub> [E <sub>Min</sub> /E <sub>Med</sub> ]	G <sub>2</sub> [E <sub>Min</sub> /E <sub>Max</sub> ]
LED 9W cálida	157	0,73	0,4
LED 9W fría	202	0,58	0,31
LED 14W cálida	261	0,72	0,41
LED 14W fría	278	0,73	0,41
LED 18W cálida	128	0,78	0,41
LED 6W c/filamen cálida	92	0,56	0,52
LFC 15W cálida	145	0,68	0,45

Realizando la lectura en cada punto se obtuvo por medición las iluminancias E<sub>máx</sub>, y E<sub>mín</sub>, y E<sub>i</sub> (de todos los demás puntos) y mediante un simple cálculo aritmético se obtuvo la E<sub>med</sub> y las uniformidades g<sub>1</sub> y g<sub>2</sub>.

Similar procedimiento se realizó para la campana de Aluminio pequeña con acabado especular, y lámpara desnuda y sus resultados se observan en la tabla III y la tabla IV, respectivamente.

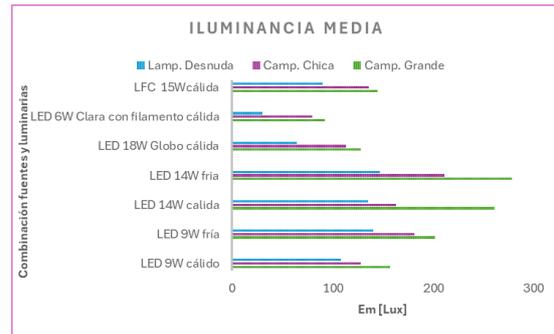
Con los datos de las tablas II, III, y IV se construyó el gráfico de la figura 7, comparando los registros para las tres alternativas mencionadas. En todos los casos la luminaria tipo campana grande mostró un comportamiento superior, especialmente al combinarla con las lámparas marca Ledvance 14 W fría y cálida, esta respuesta era previsible debido a su ángulo de apertura de 140 grados.

**Tabla 3:** Registros de E y cálculo de uniformidad para fuentes con campana grande

Fuente	E [Lux]	$G_1[E_{Min}/E_{Med}]$	$G_2[E_{Min}/E_{Max}]$
LED 9W cálida	128	0,64	0,39
LED 9W fría	181	0,76	0,53
LED 14W cálida	163	0,48	0,3
LED 14W fría	211	0,46	0,28
LED 18W cálida	113	0,67	0,38
LED 6W c/filamen cálida	80	0,48	0,2
LFC 15W cálida	136	0,67	0,53

**Tabla 4:** Registros de Iluminancia E y cálculo de uniformidad para lámpara desnuda

Fuente	E [Lux]	$G_1[E_{Min}/E_{Med}]$	$G_2[E_{Min}/E_{Max}]$
LED 9W cálida	108	0,82	0,61
LED 9W fría	140	0,84	0,63
LED 14W cálida	135	0,74	0,57
LED 14W fría	147	0,83	0,64
LED 18W cálida	64	0,85	0,63
LED 6W c/filamen cálida	30	0,76	0,75
LFC 15W cálida	90	0,62	0,45



**Figura 5:** Iluminancia media obtenida por registros para distintas combinaciones luminaria-lámpara y lámpara desnuda

En la fig. anterior se representa el comportamiento de cada fuente al asociarse con diferentes luminarias. Puede claramente observarse en color verde, la respuesta de mayor nivel de iluminancia de todas las fuentes con la luminaria tipo campana grande. Asimismo, teniendo en cuenta que los valores recomendados de iluminancia general para vivienda (interiores), según la Norma IRAM AADL J20-06 para cocina-comedor es 200 [Lux], las alternativas que satisfacen esos requerimientos serían el conjunto lámpara de LED + campana grande, para tres variantes lámparas: LED de 9W 6400K (202 Lux), LED 14W 3000K (268 Lux), y LED 14W 6500K (271 Lux); y el conjunto lámpara LED 14W 6500K con campana pequeña (211 Lux).

A continuación, se procede a analizar la mejor alternativa fijando dos criterios fundamentales: la eficiencia energética del conjunto (Lúmenes/W), los parámetros exigidos por las normas iluminancia media y uniformidad, y el confort visual asociado a varios factores de los cuales abordamos algunos. Entre las cuestiones vinculadas al confort visual, es interesante sumar el modelo de Kruithof, cuyo diagrama que se observa en la figura 6, define tres zonas: la A en la cual la atmósfera se percibe demasiado cálida, pesada, artificial, la zona B es confortable y admite determinados niveles de iluminancia conjugados con cierta temperatura de color, y la zona C donde la atmósfera es demasiado fría, se percibe lúgubre véase figura 7. Esta teoría sirve para aproximarse a las condiciones deseables de iluminación, si bien existen estudios posteriores replantean la exactitud científica de esto.

El deslumbramiento no será considerado debido a dos hechos que minimizan el riesgo: las fuentes claras han sido descartadas en el proceso; y las luminarias trabajan como artefactos apantallados por su altura de suspensión, dirigiendo el flujo luminoso hacia el plano de trabajo como puede

apreciarse también en la figura 7.

Continuando con las condiciones que aportan al confort visual, otro parámetro es el índice de reproducción de color de una fuente, el cual es independiente de la temperatura de color de esta, y se relaciona con la composición espectral de la fuente, en base a la luz natural que tiene un IRC=100, por tener un espectro continuo, y de allí las fuentes artificiales se evalúan con índices menores. Esto provoca una distorsión de los colores que se traduce en una percepción desagradable. Las lámparas LED que se comercializan actualmente en Argentina, poseen

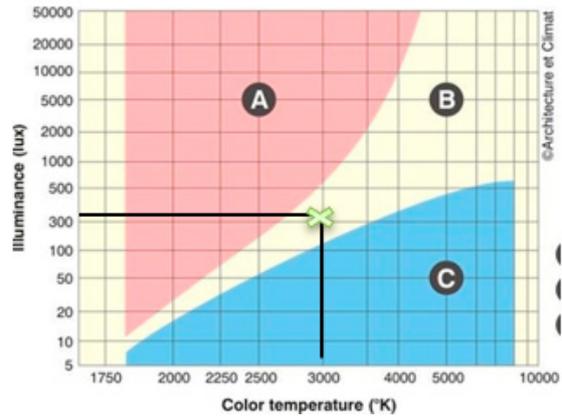
de un IRC próximo a 90, que supera el índice de las lámparas fluorescentes compactas que es aproximadamente 70-80.

Teniendo todo lo anteriormente descrito en consideración, se aplicará el criterio de combinar el nivel óptimo de iluminancia media, uniformidad, y color de fuente, acorde a las curvas de Kruithof. Según los cálculos realizados a partir de los registros en grilla, aquellos conjuntos luminaria-lámpara que superan el nivel recomendado  $E_m=200\text{Lux}$ , en todos los casos pertenecen a las fuentes LED, y entre éstos, uno con campana pequeña y tres con la luminaria tipo campana grande, en la tabla V se presentan las opciones a analizar teniendo en cuenta el criterio de confort visual.

**Tabla 5:** Luminaria y fuente con  $E \geq 200\text{Lux}$

Luminaria y fuente	Iluminancia [Lux]	Temp. de color K
Campana pequeña + 9w	211	6500
Campana grande + 9W	202	6400
Campana grande + 14W	268	3000
Campana grande + 14W	271	6500

Naturalmente la única opción que cumple ambas condiciones, iluminancia mayor a 200 Lux y confort visual comprendido en la zona B de la curva de Kruithof (atmósfera agradable), es el conjunto campana grande y lámpara LED 14W cálida, véase figura 6.



**Figura 6:** Diagrama de Kruithof. En el punto señalado trabaja la luminaria y fuente escogida. Fuente: <https://denledchatluongcao.vn/nhiet-do-mau-den-led>



**Figura 7:** Campana grande con lámpara de 14W cálida (izquierda), y 14W fría (derecha)

#### 4.2 Análisis de parámetros de iluminación para instalación en vivienda alimentada por 12V DC

Utilizando el luxómetro descrito anteriormente se tomaron los registros de iluminancia en los 16 puntos de la grilla para 4 situaciones; campana de aluminio grande, pequeña, lámpara desnuda y símil campana (usando una tapa de plástico blanco), en todos los casos empleando una lámpara LED de 18W CD 12V, 700 lúmenes, y 15.000 horas de vida útil, los resultados obtenidos se muestran en la tabla VI.

El sistema es alimentado con una batería marca Branik, JM12-55-AGM-GEL, que utiliza tecnología de plomo-ácido y es sellada, véase figura 8. Antes de realizar la conexión se procedió a verificar el voltaje, con multímetro digital auto rango marca Brinna Premium Compacto, registrando 12V.



**Figura 8:** Bateria tecnología AGM-GEL sellada e y lámpara 12V 18W DC empleados en el ensayo

La batería está diseñada para almacenamiento cíclico de energía solar, las características de la batería empleada son: alto rendimiento resistente a la corrosión Pb-Ca, rejilla multi-aleación, alta densidad de energía y densidad de potencia, capacidad optimizada de alta corriente instantánea, excelente capacidad de descarga de ciclo profundo, fuerte rendimiento a altas y bajas temperaturas, tecnología de sellado de precisión, y larga vida útil aproximadamente 10 años. Este tipo de baterías no necesitan mucho mantenimiento ni emiten gases nocivos, no conllevan peligro de derrame y tampoco generan vapores. Por ello se pueden instalar en sitios cerrados o sin ventilación, permiten descargas profundas y continuadas a diferencia de otros tipos de batería.

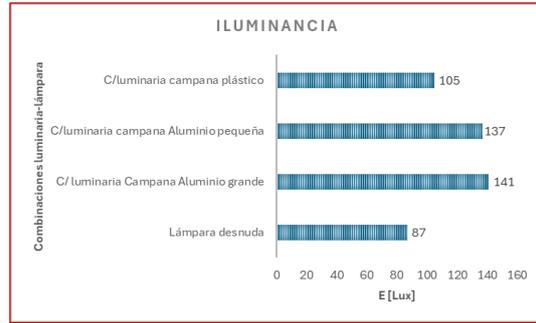
En la figura 9 se muestra un gráfico descriptivo de la iluminancia media obtenida por registros para lámpara 18W 12V DC desnuda, en campana de Al grande, pequeña y símil campana de plástico blanco, esta última introducida en el estudio para probar si una luminaria improvisada brinda mejores resultados que una lámpara desnuda.

**Tabla 6:** Registros de E, y G para la condición lámpara LED 18W-12V DC

Luminaria	Imagen	E [Lux]	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>
Lampara desnuda		87	0,69	0,48
Camp- Al grande		141	0,51	0,25
Camp -Al pequeña		137	0,57	0,27
Simil camp. plástico		105	0,66	0,45

El comportamiento de la lámpara de 18 W cálida con alimentación de 12V DC, no presenta tanta discrepancia para las diferentes opciones de luminaria-campana, pero su uso como fuente desnuda muestra una iluminancia marcadamente inferior. Por lo cual en este estudio se concluye que siempre es recomendable utilizar una luminaria tipo campana para orientar el flujo luminoso hacia las zonas donde éste es requerido, y reducir el flujo hacia el hemisferio superior. Al tratarse en este caso de una fuente cálida (3000K) se aconseja

escoger la luminaria campana de aluminio grande que ofrece una Iluminancia media de 141 Lux.



**Figura 9:** Iluminancia media obtenida por registros para lámpara 12V DC

### 4.3 Cálculo de la remisión potencial en las toneladas de CO2 equivalente

Para proceder a realizar el cálculo de toneladas equivalentes de dióxido de carbono no emitidas al ambiente por eficiencia energética en iluminación, existen diferentes metodologías, siempre teniendo en cuenta que variará de un país a otro, según la composición por fuentes de generación en su matriz eléctrica, e incluso de un año a otro, ya que se producen variaciones en los niveles de generación hidroeléctrica o aportación de las nuevas energías renovables (eólica, solar, hidráulica menor a 50MW). Aunque existen algunas herramientas que permiten ser empleadas en diferentes contextos.

Tomando una vivienda social tipo de dos dormitorios, si se sustituyen 6 lámparas (cocina-comedor, dormitorio, baño, 1 lámpara de mesa, 1 luminaria en el portal de ingreso), se tendría en base a la comparación de eficacia de fuentes, corroborado con los registros de iluminancia, una alternativa como la presentada en la tabla VII, si se reemplazan todas las lámparas en cada vivienda de manera de igualar los niveles de iluminancia obtenidos, y con el criterio que otras dependencias del hogar (dormitorios, baño) tienen menores requerimientos que el ambiente cocina-comedor, y pueden ser satisfechos con lámparas LED de 9W.

Asimismo, esta potencia lumínica instalada equivalente para cada tecnología de iluminación deberá ser transformada en la energía anual consumida teniendo en cuenta las horas de encendido para todas las estaciones del año, donde varía el número de horas de luz diurna, y además se considera una familia de 4 miembros o más, por lo cual pueden estar encendidas simultáneamente varias lámparas. Adoptando un

critorio conservador de la iluminación utilizada, se consideró 4 horas diarias de uso, para las 6 luminarias. Un principio medurado del encendido que contribuiría a un ahorro significativo y debe ser promovido en forma continua entre los usuarios, siempre teniendo en cuenta que las fuentes LED tienen su ciclo de vida asegurado mientras alternen períodos mayores a 15 minutos de apagado y 45 minutos de encendido, razón por lo cual la vida útil de las lámparas de un baño muestra un comportamiento de reducción de esta. La vida útil en el caso de las fuentes luminosas de LED y OLED, es definida como el tiempo en horas entre el comienzo de su uso y el momento en que, en el 50 % de una población de fuentes luminosas, la producción de luz se ha degradado progresivamente hasta un valor inferior al 70 % del flujo luminoso inicial. Se denomina también vida útil L70B50 para la normativa internacional. Para medir esto la industria ha creado el estándar de medición IES LM80-80-2008 y el IES TM21-2011 que proyecta el mantenimiento a largo plazo del flujo luminoso de las fuentes de luz LED.

El cálculo de las toneladas de CO2 remitidas se realiza empleando factor de emisión adoptado de 0,4071 tCO2/MWh, y aplicando la ecuación (1) citada en la sección metodología.

La tabla VII construida obteniendo la potencia instalada y la energía consumida diaria y anual muestra el importante ahorro energético debido a la eficiencia de las nuevas tecnologías, y a la magnitud del proyecto sobre el cual se realiza la estimación (27.000 u).

Al transformar los MWh en tCO2 mediante la ecuación (1), se consigue una remisión de 5231 tCO2 al reemplazar la tecnología incandescente por LED; y una disminución de 773 tCO2 con la sustitución de LFC por LED.

**Tabla 7:** Tecnologías de iluminación y tCO2

Tecnolog. de iluminación	Energía cons. diaria x vivienda	Energía cons. anual x 27.000 u	tCO2
			eq.
LED	64Wx4h=	2.522,8 MWh	1.028 tCO2
2x14W	256Wh/día		
	4x9W		
Incandesc.	390Wx4h=	15.373,8 MWh	6.259 tCO2
2x75W	1560Wh/día		
	4x60		
LFC	112Wx4h=	4.415,0 MWh	1.797 tCO2
2x26W	448Wh/día		
	4x15W		

Los árboles son considerados pulmones del planeta gracias a su capacidad de absorber CO2 y producir oxígeno, aunque puede variar, según información publicada por Garret (2021) de la Fundación Aquae, un árbol absorbe aproximadamente entre 10kg y 30 Kg de CO2 al año. Con estos datos se determinará la cantidad de árboles que representaría un proyecto de eficiencia energética por sustitución de lámparas y utilización de luminarias en vivienda social.

En la figura 10 se puede apreciar las toneladas equivalentes de CO2 que se producen con los diferentes sistemas de iluminación anualmente, y su relación con la cantidad de árboles que esto representa. Observando estos números aún e la mejor condición de eficiencia cada familia que habite el hogar debiera plantar 2 (dos) árboles para cubrir los 51.000 que representa su consumo anual.

Con respecto a la tecnología LED entonces, su instalación sería equivalente a plantar 39.000 árboles según si se compare con LFC por año, lo que implica un número muy interesante.



**Figura 10:** Arboles necesarios para absorber las teq. CO2 generadas anualmente por la iluminación en vivienda rural

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos al estudiar el comportamiento de una luminaria simple tipo campana metálica con fuentes LED se interpretaron teniendo en cuenta el incremento de eficacia luminosa (eficiencia), y la condición de confort visual, ejes de la calidad de iluminación.

La creación de una atmósfera agradable involucra la relación existente entre iluminancia y temperatura de color de la fuente (Kruithof), y además el IRC ≈90 para fuentes de LED de uso doméstico. Hay otros elementos que se conjugan en la ecuación, tal como el color y acabado de paredes y techo, y la presencia de obstrucciones en el ambiente.

La eficiencia en iluminación es una herramienta

válida para la reducción de emisiones, en poblaciones dispersas del interior de Santiago del Estero, así como lo es la instalación de sistemas tecnológicos basados en energías renovables especialmente fotovoltaico aislado, o mini eólica para zonas sin abastecimiento de red eléctrica. Se realizó el ensayo simulando las condiciones de alimentación con 12V DC, como una manera de mostrar la situación de generación aislada donde la emisión de CO<sub>2</sub> es cero. Aunque la eficacia de lámpara LED utilizada no era alta, resultado suficiente y se demostró que su instalación con luminaria tipo campana mejoraba la prestación. Cumplir la Agenda 2030 de la ONU y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, es un compromiso asumido por la República Argentina. Y esto implica poner la igualdad y la dignidad de las personas en el centro y llamar a cambiar el estilo actual de desarrollo, respetando el medio ambiente y el derecho intergeneracional. Desde cada pequeña iniciativa, se aporta para edificar ese “Futuro deseado” que es posible y necesario, un futuro de desarrollo sostenible, inclusivo y con visión de largo plazo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la secretaria de Ciencia y Técnica de la FCEyT UNSE, Dra. María José BENAC, en el marco de los proyectos “Expectativas en horizontes posibles de desarrollo humano a partir de energías no convencionales en áreas rurales con población dispersa de SDE” Código: 23/C168, y “Estudio de viabilidad técnico económico para optimizar instalaciones de A°P° LED en vías de circulación de centros urbanos con suministro de energía híbrido solar FV- red eléctrica” código 26/C194.

## REFERENCIAS

Aguilar, S. et al. (2019). Plan Nacional de adaptación y mitigación al cambio climático al 2030, Argentina. Ed. Dirección Nacional de CC. Recuperado 14/09/2023

<https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/plan-nacional>

Beinstein, J. (2016). Manual de Prospectiva. Guía para el diseño e implementación de estudios prospectivos. ISBN 978-987-1632-59-6. Ed. Ministerio de Ciencia, tecnología e innovación productiva.

CAMMESA. Demanda real y prevista del SADI.

Matriz de generación eléctrica Argentina. Recuperado el 25/07/2024

[https://cammesaweb.cammesa.com/operacion/?doing\\_wp\\_cron=172195248.5969049930572509765625#opmaxhist](https://cammesaweb.cammesa.com/operacion/?doing_wp_cron=172195248.5969049930572509765625#opmaxhist)

CEPAL Org. ONU (1948). Objetivos de desarrollo sostenible en la Agenda 2030.

Recuperado 20/07/2023 <https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible/objetivos-desarrollo-sostenible-ods>

Garret C. (2021) Fundación Aequae. ¿Cuánto CO<sub>2</sub> absorbe un árbol? Madrid. Recup.03/04/2024

[https://www.fundacionaequae.org/wp-content/uploads/2016/04/infografia\\_oxigeno.pdf](https://www.fundacionaequae.org/wp-content/uploads/2016/04/infografia_oxigeno.pdf)

Gobierno de Argentina. La iluminación eficiente otro aliado del uso racional de la electricidad. Publicado el 06/11/2022. Recup. 13/03/2024.

<https://www.argentina.gob.ar/noticias/la-iluminacion-eficiente-otra-aliada-del-uso-racional-de-la-electricidad>

Gobierno de Argentina. Proyecto de Eficiencia Energética y Energía renovable en la vivienda social. aprobado 22/05/2023. Rec. 04/11/2023. <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/eficiencia-energetica/eficiencia-energetica-en-edificaciones/pronev-programa-nacional-de-etiquetado-de-viviendas>

Gobierno de Argentina. Cálculo del Factor de Emisión de CO<sub>2</sub> de la Red Argentina de Energía Eléctrica. Data.set (2013). Recup.30/03/2024

<https://datos.gob.ar/dataset/energia-calculo-factor-emision-co2-red-argentina-energia-electrica>

Gobierno de Argentina, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, noviembre 2015, Primer reporte bienal de actualización RA a la CMNUCC sobre CC. Recup.12/07/2022.

<https://unfccc.int/resource/docs/natc/argbur1.pdf>

Gobierno de Argentina (2021). Estrategia de desarrollo resiliente con bajas emisiones a largo

plazo a 2050, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, Jefatura de Gabinete. Recuperado 22/07/2023.

[https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/estrategia\\_de\\_desarrollo\\_resiliente\\_con\\_bajas\\_emisiones\\_a\\_largo\\_plazo\\_2050.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/estrategia_de_desarrollo_resiliente_con_bajas_emisiones_a_largo_plazo_2050.pdf)

Kirschbaum C, Raitelli M, Rigali S, Quiroz F (2008). Reemplazo de lámparas incandescentes por FC, comparación de las condiciones operativas y de iluminación resultantes. Memorias del IX Congreso Panamericano de Iluminación, Rosario, Argentina. Ed. AADL.

Ley 24.295 aprobación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático sancionada 07/12/1993

<https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/0-4999/699/norma.htm>

Ley 26.190/06 y su modificatoria 27.192/15 Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables destinada a la producción de energía eléctrica sancionada 23/09/ 2015

<https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27191-253626>

Ley 27.520/19 Presupuestos mínimos para la adaptación y mitigación al Cambio Climático Global sancionada 20/11/2019.

<https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27520-333515>

Ley 27.270 aprobación del Acuerdo de Paris, sancionada 01/09/2016

<https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27270-265554>

Mari M, (2021) Documentos de clase, Posgrado Bases y herramientas para la gestión de adaptación y mitigación al cambio climático, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, UNqu, Unju, y PNUCC.

Norma IRAM AADL J 20-06 (1972) Iluminación artificial de interiores. niveles de iluminación IRAM. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. AADL. Asociación Argentina de Luminotecnia.

Norma IES LM80 o Medición del mantenimiento del flujo luminoso de las fuentes de luz LED) / IES TM21-2011 para fuentes de luz LED <https://www.es.lumistrips.com/lumistrips-blog/led-lifetime-es/>

ONU (2015) Objetivos de Desarrollo Sostenible en la Agenda de la ONU. Recuperado 15/09/2022

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>

Raitelli, M. y Rigali S. (2008). Fotometría de luminarias, eficiencia energética y calidad en iluminación. Primera parte: Alumbrado de interiores. Revista Luminotecnia, Nro. 89 pag. 88-92. Marzo/abril 2008, Asociación Argentina de Luminotecnia (AADL).

<https://aadl.com.ar/index.php/revista/>

Rosenfeld E. et al, (2007). Ahorro de energía en el sector residencial su contribución a la disminución de gases de efecto invernadero (GEI). Avances en Energía Renovable y Medio

Ambiente. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/index>

SOHOBI LIGHTING S.A. (2022). Gráfico de Kruithof que muestra la relación entre la temperatura de color de la luz y la iluminancia requerida. Cómo elegir la escala de temperatura color de led correcta. Recuperado el día 05/04/2024.

<https://denledchatluongcao.vn/nhiet-do-mau-den-led>



## ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA PARA REACCIONES FLUIDO-SÓLIDO CON PARTÍCULAS DE DIFERENTES TAMAÑOS

Tarifa, Enrique E.<sup>1 2</sup>; Martínez, Sergio L.<sup>1</sup>; Franco Domínguez, S.<sup>1</sup>; Núñez, Álvaro F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy

<sup>2</sup> CONICET

\* [etarifa@fi.unju.edu.ar](mailto:etarifa@fi.unju.edu.ar); [smartinez@fi.unju.edu.ar](mailto:smartinez@fi.unju.edu.ar); [sfrancodominguez@fi.unju.edu.ar](mailto:sfrancodominguez@fi.unju.edu.ar); [afnunez@fi.unju.edu.ar](mailto:afnunez@fi.unju.edu.ar)

**RESUMEN:** La estimación del tiempo de residencia requerido para lograr una conversión deseada en una reacción fluido-sólido demanda un gran esfuerzo computacional. Este esfuerzo es aún mayor cuando las partículas sólidas tienen tamaños diferentes. Por ese motivo, es de interés desarrollar modelos simplificados que permitan realizar dicha estimación con un menor esfuerzo. En este trabajo, se proponen modelos simplificados para el caso de reacciones heterogéneas que pueden ser representadas con el modelo de núcleo decreciente, con resistencia controlante en la transferencia de masa a través de la película, en la reacción química o en la difusión a través de la ceniza. Los modelos que se proponen fueron desarrollados para reactores con flujo pistón y para reactores perfectamente mezclados continuos. Estos modelos son de dos tipos: correlaciones y redes neuronales artificiales. Para desarrollar las correlaciones, se seleccionaron funciones que cumplen con determinadas condiciones matemáticas. Estas funciones luego fueron ajustadas por regresión. Por otra parte, se probaron diferentes estructuras de redes neuronales artificiales hasta encontrar la que minimiza el error de prueba. Tanto para ajustar las correlaciones como para entrenar las redes neuronales, se emplearon datos obtenidos a partir de resolver el modelo de núcleo decreciente considerando distintas etapas controlantes.

**Palabras claves:** Núcleo decreciente, correlaciones, redes neuronales artificiales.

**ABSTRACT:** The estimation of the residence time required to achieve a desired conversion in a fluid-solid reaction demands a great computational effort. This effort is even greater when the solid particles have different sizes. For this reason, it is of interest to develop simplified models that allow such estimation with less effort. In this work, simplified models are proposed for the case of heterogeneous reactions that can be represented with the shrinking-core model, with controlling resistance in the mass transfer through the film, in the chemical reaction or in the diffusion through the ash. The proposed models were developed for plug flow reactors and for continuous perfectly mixed reactors. These models are of two types: correlations and artificial neural networks. To develop the correlations, functions that meet certain mathematical conditions were selected. These functions were then fitted by regression. In addition, different structures of artificial neural networks were tested until the one that minimizes the test error was found. Both to adjust the correlations and to train the neural networks, data obtained from solving the shrinking-core model considering different controlling stages were used.

**Keywords:** Shrinking core, correlations, artificial neural networks.

### INTRODUCCIÓN

Las reacciones entre fluidos y sólidos desempeñan un papel crucial en la industria química. Por esa razón, es de gran interés desarrollar modelos para ese tipo de reacciones. Uno de los primeros estudios sobre los aspectos generales de esas reacciones fue realizado por Wen (1968). En ese trabajo, se plantean tres tipos de sistemas: (i) un sistema con un frente de reacción definido y un núcleo sin reaccionar que se contrae, (ii) un sistema homogéneo sin gradientes, (iii) un sistema con gradiente en la concentración del fluido y en la del sólido.

El primero de esos casos se denomina modelo de núcleo decreciente, SCM por sus siglas en inglés (*shrinking-core model*). Ese modelo se aplica a una amplia variedad de reacciones que cumplen con una de las siguientes condiciones: (i) el sólido no es poroso, (ii) el sólido es poroso pero la resistencia de la reacción química es pequeña en comparación a la resistencia de la difusión del fluido. En el

SCM, la reacción ocurre en la superficie del núcleo del reactivo que aún no reaccionó. Este núcleo se contrae a medida que avanza la reacción, dejando atrás una capa de ceniza. Entre las reacciones que pueden ser representadas con ese modelo, se encuentran la combustión del carbón, la tostación de blenda, reacciones líquido-sólido y reacciones gas-sólido (Yagi & Kunii, 1955).

El SCM se utiliza para determinar la conversión en función del tiempo de residencia, y viceversa. En ciertas situaciones, se puede obtener una solución analítica. Sin embargo, en la mayoría de los casos, es necesario emplear métodos numéricos, lo que conlleva una considerable carga computacional.

Lo expuesto llevó al desarrollo de correlaciones que permiten estimar las variables de interés sin la necesidad de utilizar métodos numéricos. Yagi y Kunii (1961a, 1961b) y Levenspiel (2019) presentaron correlaciones que son comúnmente utilizadas en el cálculo de reactores. No obstante, dichas correlaciones son aplicables solo cuando el tamaño de las partículas es uniforme. Cuando las

partículas tienen diferentes tamaños, el modelo es más complejo, y tanto el cálculo de la conversión como el del tiempo de residencia son únicamente posibles en forma numérica. Sin embargo, es el cálculo del tiempo de residencia el que demanda un mayor esfuerzo computacional.

En el presente trabajo, para partículas de diferentes tamaños, se proponen modelos simplificados para reacciones heterogéneas representadas por el SCM, con resistencia controlante en la transferencia de masa a través de la película, en la reacción química o en la difusión a través de la ceniza. Los modelos que se proponen fueron desarrollados para reactores con flujo pistón, los PFR (*plug flow reactors*), y para reactores perfectamente mezclados, tales como los FBR (*fluidized-bed reactors*) y los CSTR (*continuous stirred reactor*). Los modelos desarrollados para estimar el tiempo de residencia requerido para alcanzar una conversión deseada son de dos tipos: correlaciones y RNA (redes neuronales artificiales). Tanto para ajustar las correlaciones como para entrenar las RNA, se emplearon datos obtenidos a partir de resolver el modelo de núcleo decreciente considerando distintas etapas controlantes.

### MODELO DE NÚCLEO DECRECIENTE

En el SCM, la reacción ocurre inicialmente en la superficie de la partícula de radio  $R_0$ ; luego, el frente de reacción avanza hacia el interior de la partícula. El núcleo que queda sin reaccionar, con radio  $r_c$ , va disminuyendo su tamaño con el tiempo, dejando atrás una capa de ceniza. En este proceso, el tamaño de la partícula se mantiene constante. La Fig. 1 presenta la evolución del perfil de concentración  $C_B$  del sólido a medida que el frente de reacción avanza con el tiempo. La Fig. 2 presenta el perfil de la concentración  $C_A$  del fluido, en este caso un gas.  $C_{Ag}$  es la concentración en el entorno,  $C_{As}$  es la concentración en  $r = R_0$ , y  $C_{Ac}$  es la concentración en  $r = r_c$ .

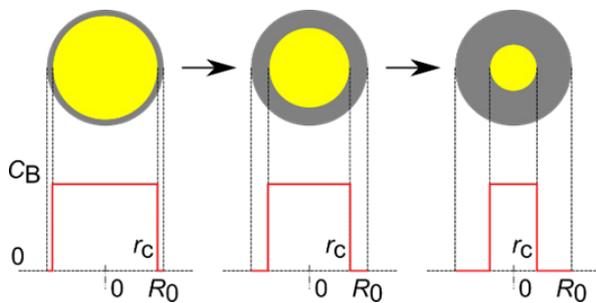


Figura 1: Concentración del sólido B en el SCM

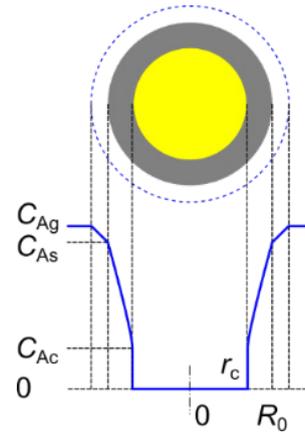


Figura 2: Concentración del fluido A en el SCM

Para una reacción  $A_{(g)} + bB_{(s)} \rightarrow rR_{(g)} + pP_{(s)}$ , el SCM considera las resistencias asociadas a las siguientes etapas: (i) difusión del gas A desde el entorno de la partícula a la superficie de esta a través de la película de gas que la rodea, (ii) difusión de A a través de la capa de ceniza hacia la zona de reacción, (iii) reacción química en la superficie del núcleo que queda sin reaccionar, (iv) difusión del producto gaseoso R de la reacción a través de la capa de ceniza hacia la superficie externa de la partícula, (v) difusión del producto gaseoso a través de la película de gas que rodea a la partícula hacia el entorno.

Las principales hipótesis del SCM son las siguientes: (a) el reactivo B no es poroso, (b) el producto P es poroso, (c) cada etapa de transferencia de materia y reacción es una resistencia en serie para la velocidad global de reacción, (d) la etapa más lenta es la controlante, (e) el reactivo A está en exceso y su concentración en el entorno es constante, (f) las partículas son esféricas, (g) el proceso es isotérmico, (h) la densidad del sólido es constante, (i) la velocidad de contracción del núcleo que permanece sin reaccionar es mucho menor que la velocidad de difusión a través de la capa de ceniza.

En la bibliografía comúnmente empleada para el cálculo de reactores (Froment et al., 2011; Levenspiel, 2019), se presentan ecuaciones que permiten el cálculo de la velocidad global de reacción cuando alguna de las resistencias del modelo es la controlante. De ese modo, se tienen las correspondientes ecuaciones para película controlante, reacción controlante y ceniza controlante.

## PARTÍCULAS UNIFORMES

### 3.1 Reactores con flujo pistón

El SCM fue aplicado en el estudio de partículas aisladas. Los resultados de ese estudio se pueden emplear en el diseño de PFR considerando que cada volumen diferencial contiene partículas con tamaño y tiempo de residencia uniforme. A continuación, se presentan las ecuaciones producidas por el SCM cuando se identifican distintas resistencias controlantes.

#### 3.1.1 Película controlante

La Fig. 3 muestra el perfil de concentración del fluido cuando la transferencia de masa a través de la película que rodea a la partícula es mucho más lenta que la difusión a través de la capa de ceniza y que la reacción química. Es decir, se tiene que la resistencia controlante es la correspondiente a la película.

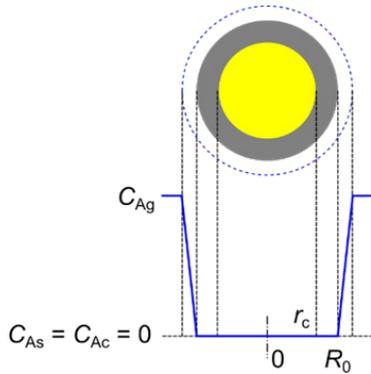


Figura 3: Concentración del fluido A para película controlante

En este caso, el SCM tiene solución analítica:

$$\frac{t}{\tau} = X_B \tag{1}$$

Donde  $X_B$  es la conversión del sólido,  $t$  es el tiempo de reacción, y  $\tau$  es el tiempo requerido para conversión completa del sólido.

#### 3.1.2 Reacción controlante

La Fig. 4 muestra el perfil de concentración del fluido cuando la reacción química es mucho más lenta que la transferencia de masa a través de la película que rodea a la partícula y que la difusión a través de la capa de ceniza. Es decir, se tiene que la resistencia controlante es la correspondiente a la reacción.

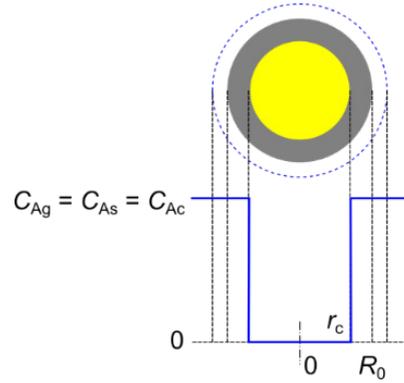


Figura 4: Concentración del fluido A para reacción controlante

En este caso, el SCM tiene solución analítica para el tiempo:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_B)^{1/3} \tag{2}$$

Sin embargo, para obtener  $X_B$ , se deben obtener las tres soluciones de la ecuación anterior y evaluarlas para determinar cuál de ellas es la que tiene sentido físico.

#### 3.1.3 Ceniza controlante

La Fig. 5 muestra el perfil de concentración del fluido cuando la difusión a través de la capa de ceniza es mucho más lenta que la transferencia de masa a través de la película que rodea a la partícula y que la reacción química. Es decir, se tiene que la resistencia controlante es la correspondiente a la ceniza.

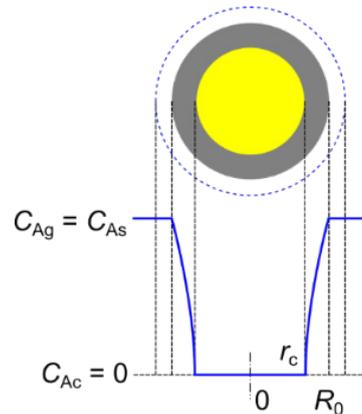


Figura 5: Concentración del fluido A para ceniza controlante

En este caso, el SCM tiene solución analítica para el tiempo:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - 3(1 - X_B)^{2/3} + 2(1 - X_B) \tag{3}$$

No obstante, para obtener  $\bar{X}_B$ , se debe resolver numéricamente la ecuación anterior.

### 3.2 Reactores perfectamente mezclados

Para reactores perfectamente mezclados continuos, FBR o CSTR, el tiempo promedio de residencia es  $\bar{t} = V / F_0$ , donde  $V$  es el volumen del reactor, y  $F_0$  es el caudal de alimentación de sólidos. Por otra parte, la conversión promedio  $\bar{X}_B$  se obtiene al resolver las siguientes ecuaciones:

$$\bar{X}_B = \int_0^{\tau} X_B(t) E(t) dt \tag{4}$$

$$E(t) = \frac{e^{-t/\bar{t}}}{\bar{t}} \tag{5}$$

Donde  $E(t)$  es la distribución de tiempos de residencia de las partículas en el reactor.

A continuación, se presentan las soluciones analíticas para la conversión considerando las distintas resistencias controlantes. En el caso de ceniza controlante, no es posible obtener la solución analítica. Tampoco es posible obtener la solución analítica para el tiempo en ninguno de los casos.

Película controlante:

$$\bar{X}_B = \frac{\bar{t}}{\tau} (1 - e^{-\tau/\bar{t}}) \tag{6}$$

Reacción controlante:

$$\bar{X}_B = 3 \frac{\bar{t}}{\tau} - 6 \left(\frac{\bar{t}}{\tau}\right)^2 + 6 \left(\frac{\bar{t}}{\tau}\right)^3 (1 - e^{-\tau/\bar{t}}) \tag{7}$$

### PARTÍCULAS NO UNIFORMES

Cuando las partículas alimentadas al reactor no tienen un tamaño uniforme, la distribución de tamaños puede ser representada por una distribución discreta provista por un sistema de tamizado, tal como la que se muestra en la Fig. 6. En el histograma de esa figura,  $F_0(R_i)$  es el caudal de alimentación de sólidos correspondiente a la clase de partículas con radio medio  $R_i$ . Por lo tanto, se tiene:

$$F_0 = \sum_{i=1}^m F_0(R_{0i}) \tag{8}$$

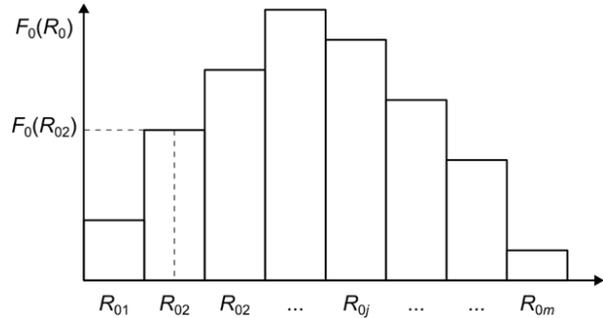


Figura 6: Histograma de radios de partículas

En este caso, la conversión media para un PFR puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\bar{X}_B = \sum_{i=1}^m X_B(R_{0i}) F_0(R_{0i}) / F_0 \tag{9}$$

En cambio, la conversión media para un FBR o un CSTR es:

$$\bar{X}_B = \sum_{i=1}^m \bar{X}_B(R_{0i}) F_0(R_{0i}) / F_0 \tag{10}$$

Nuevamente, las expresiones obtenidas para la conversión media son bastante complejas, y el cálculo del tiempo de reacción requiere el empleo de métodos numéricos.

## MÉTODO

### 5.1 Cálculo de la conversión promedio

En esta sección, se explica el método empleado para el caso de un reactor perfectamente mezclado continuo. El mismo método fue aplicado a un PFR, pero usando  $\bar{X}_B$  y  $\bar{t}$  en lugar de  $X_B$  y  $t$ , respectivamente.

Para cada caso estudiado, se evaluó la correspondiente solución numérica de  $\bar{X}_B$  para generar una tabla de valores de  $\bar{X}_B$  vs.  $\bar{t}$ . Luego, a los datos de la tabla, se ajustaron los modelos simplificados para calcular  $\bar{t}$  en función de  $\bar{X}_B$ .

Se asumió que la función de masa de probabilidad pmf de los tamaños de partículas (probability mass function) era conocida. De esa manera, se contó con  $c$  pares ordenados  $(R_{0i}, p_i)$ , donde  $p_i$  es la probabilidad de que una partícula pertenezca a la clase con radio medio  $R_{0i}$ . Esta probabilidad es igual a la fracción másica o volumétrica de las partículas pertenecientes a la clase considerada.

Los  $\tau_i$  fueron calculados considerando la resistencia controlante (Levenspiel, 2019).

Película controlante:

$$\tau = \alpha R_0^{1.5-2} \quad (11)$$

Para el caso de estudio, se adoptó el valor 2 para el exponente.

Reacción controlante:

$$\tau = \alpha R_0 \quad (12)$$

Ceniza controlante:

$$\tau = \alpha R_0^2 \quad (13)$$

La conversión media  $\hat{X}_B$  para un dado tiempo de residencia promedio  $\hat{t}$  fue calculada considerando la distribución de tamaños de partículas y la solución correspondiente a la resistencia controlante (Levenspiel, 2019).

$$\hat{X}_B = \sum_{i=1}^c \bar{X}_B \left( \frac{\bar{t}}{\tau_i} \right) p_i = \sum_{i=1}^c \bar{X}_B \left( \frac{\bar{t}}{\alpha R_{0,i}^\beta} \right) p_i \quad (14)$$

El valor de  $\alpha$  puede ser calculado o medido. En este trabajo, se le asignó el valor 1; por lo tanto, puede recuperarse el verdadero  $\bar{t}$  multiplicando por  $\alpha$  al valor reportado para  $\bar{t}$  d por los modelos simplificados.

### 5.2 Regresión

Para llevar a cabo la regresión de las correlaciones que se desarrollaron en este trabajo, se empleó el lenguaje de programación Python 3.10.4 junto a la librería `scipy.optimize`. Esa librería contiene la función `curve_fit`, la cual adopta el criterio de mínimos cuadrados para llevar a cabo el ajuste de las funciones suministradas.

Se probaron una variedad de funciones que fueron evaluadas con el AIC (Akaike's Information Criterion). La función con el menor valor de AIC es la mejor. Ese criterio favorece a las funciones más simples sobre aquellas con más parámetros (Akaike, 1974). Las funciones probadas fueron escogidas observando el cumplimiento de las siguientes condiciones matemáticas:  $\bar{t}$  es siempre creciente con:

$$\lim_{\hat{X}_B \rightarrow 0^+} \bar{t} = 0 \text{ y } \lim_{\hat{X}_B \rightarrow 1} \bar{t} = \infty$$

Los coeficientes de las funciones seleccionadas fueron redondeados considerando el error asociado a ellos. Para evaluar el ajuste, se empleó el coeficiente de determinación  $r^2$ .

### 5.3 Redes neuronales artificiales

La estructura básica de una RNA consiste en unidades de procesamiento —las neuronas artificiales— configuradas como un modelo simplificado de las neuronas biológicas (Fig. 7). Las neuronas están interconectadas y organizadas en capas.

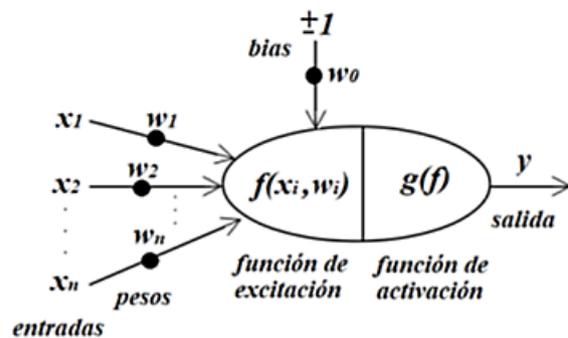


Figura 7: Modelo de una neurona artificial

En el modelo general de una neurona artificial, se pueden reconocer los siguientes elementos básicos:

- Un conjunto de datos de entrada ( $x_1 \dots x_n$ ) provenientes del exterior de la RNA o de otras neuronas internas.
- Un conjunto de coeficientes, denominados pesos ( $w_1 \dots w_n$ ), que multiplican a sus respectivas entradas y determinan el comportamiento de cada neurona.
- Una entrada especial —el bias— que recibe un valor fijo ( $\pm 1$ ). Este parámetro tiene asociado un coeficiente de peso  $w_0$ .
- Una función de entrada  $f(x_i, w_i)$  —la función de excitación— que combina linealmente a las entradas moduladas por los pesos.
- Una función de salida  $g(f)$  —identificada como función de activación— que procesa el resultado de la función de excitación para producir el resultado que se asigna a la variable de salida y de la neurona.

De acuerdo con el formato de agrupamiento de las neuronas, el tipo de interconexión entre ellas y el método de aprendizaje, se obtienen diferentes

arquitecturas de redes, con diferentes capacidades operativas.

Las RNA son modelos empíricos, por lo cual sus parámetros (pesos y bias) son ajustados empleando un conjunto de datos provenientes del sistema que se quiere modelar. Esto se realiza en la etapa de entrenamiento. Además de los parámetros, también se pueden modificar los hiperparámetros —la estructura (cantidad de nodos y capas) y las funciones de excitación y activación— para mejorar el desempeño de la red. Todas estas posibilidades dotan de una gran flexibilidad a las RNA, por lo cual pueden ajustarse para emular (mapear) cualquier relación que exista entre las entradas y las salidas del sistema analizado. Sin embargo, como todo modelo empírico, se debe considerar el riesgo de que el modelo se sobreajuste a los datos empleados y, de ese modo, pierda capacidad de generalización o predicción.

En la etapa de entrenamiento, los datos disponibles se dividen en tres subconjuntos: el de entrenamiento, el de validación y el de prueba. Con los primeros se ajustan los parámetros de la red, con los segundos se evalúa la capacidad de generalización de la red para el ajuste realizado, y con el tercero se evalúa la red ya entrenada.

Para validar el modelo, se empleó una variante del método de la validación cruzada (Devijver & Kittler, 1982). La validación cruzada o *cross-validation* es una técnica utilizada para evaluar los resultados de un análisis estadístico y para garantizar que son independientes de la partición entre datos de entrenamiento y validación.

Si bien el entrenamiento de una RNA demanda tiempo y esfuerzo, una vez que está entrenada, se la puede usar sin necesidad de repetirlo. En la etapa de producción, la RNA muestra una de sus grandes ventajas: la velocidad de respuesta. En efecto, mientras que la resolución de los modelos matemáticos tradicionales demanda un tiempo considerable de cálculo, la RNA solo tiene que ser evaluada, lo que produce un resultado inmediato.

Las RNA de tipo *feedforward*, configuradas con funciones internas de tipo sigmoide, pueden aproximar funciones reales y continuas si son estructuradas con la suficiente cantidad de unidades neuronales internas y una capa oculta como mínimo. Tal afirmación se sustenta en base al Teorema de Aproximación Universal dado por

Cybenko (1989).

En este trabajo, se empleó Matlab en el fin de configurar diferentes tipos de RNA para ajustar a las tablas de valores de  $t_{\bar{d}}$  vs.  $\hat{X}B$  obtenidos por simulación. Los tipos de RNA y las funciones de activación empleados fueron la red *feedforward backpropagation*, con funciones sigmoide en las capas ocultas (Fig. 8), la red *feedforward cascade*, la cual incorpora conexiones adicionales de cada capa a las subsiguientes (Fig. 9), y la red RBF (radial basis function), la cual utiliza funciones radiales de tipo gaussianas en la capa oculta (Fig. 10). Estas redes se consideran aproximadores universales clásicos (Beale et al., 2018).

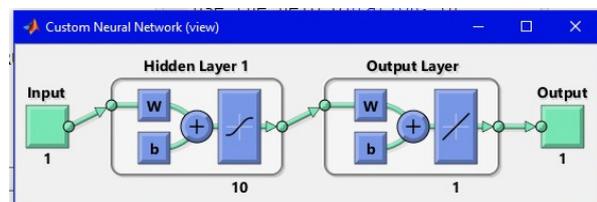


Figura 8: Red *feedforward*

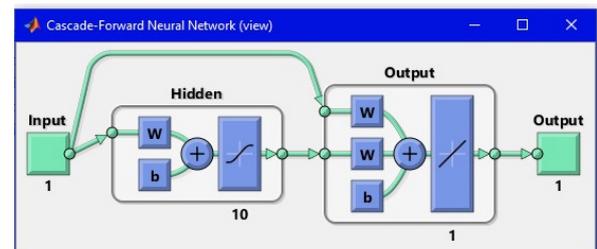


Figura 9: Red *feedforward cascade*

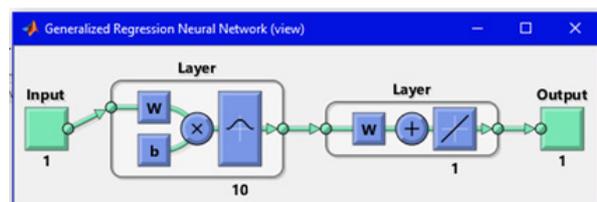


Figura 10: Red RBF

## RESULTADOS

### 6.1 Caso de estudio

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos al aplicar los modelos simplificados propuestos. Para ello, se tomó como caso de estudio a las distribuciones de tamaño experimentales reportadas por Lu et al. (2015). Dichas distribuciones tienen un diámetro medio de partícula en el intervalo [18 um, 224 um]. Dos de las distribuciones seleccionadas, la a

y la g, corresponden a los tamaños extremos de partículas; la tercera, la e, corresponde a tamaños intermedios. De la Tabla 1 a la Tabla 3, se presentan las distribuciones seleccionadas. Los 3 histogramas considerados tienen 5 clases. Para cada clase, se indican el radio medio  $R_0$  y la probabilidad  $p$  (igual a la fracción volumétrica de la clase).

**Tabla 1:** Distribución a empleada como caso de estudio (Lu et al., 2015)

$i$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$
1	4.64	0.3565
2	13.61	0.3735
3	22.58	0.1878
4	31.55	0.0715
5	40.52	0.0107

**Tabla 2:** Distribución e empleada como caso de estudio (Lu et al., 2015)

$i$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$
1	15.18	0.1039
2	45.14	0.3637
3	75.10	0.3227
4	105.06	0.1679
5	135.02	0.0418

**Tabla 3:** Distribución g empleada como caso de estudio (Lu et al., 2015)

$i$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$
1	50.18	0.2039
2	150.14	0.3706
3	250.10	0.2801
4	350.06	0.1241
5	450.02	0.0213

## 6.2 Regresión

### 6.2.1 Reactores con flujo pistón

Para los PFR, la siguiente función fue la que produjo el mejor ajuste a los resultados de las simulaciones:

$$t_d = a\hat{X}_B + b\hat{X}_B(1 - \hat{X}_B^c)^d \tag{15}$$

Los coeficientes de la ecuación anterior, obtenidos por regresión para los diferentes casos, se reportan desde la Tabla 4 a la Tabla 12. Esos coeficientes fueron redondeados considerando el error asociado a ellos. El ajuste fue casi perfecto de acuerdo con los valores del coeficiente  $r^2$ .

**Tabla 4:** Coeficientes para PFR con película controlante. Distribución a

Bondad de ajuste	
$r^2$	0.9965
Coeficientes redondeados	
$a$	-1.33
$b$	0.9973
$c$	0.214
$d$	-0.414

**Tabla 5:** Coeficientes para PFR con reacción controlante. Distribución a

Bondad de ajuste	
$r^2$	0.9994
Coeficientes redondeados	
$a$	-0.616
$b$	0.836
$c$	1
$d$	-0.25

**Tabla 6:** Coeficientes para PFR con ceniza controlante. Distribución a

Bondad de ajuste	
$r^2$	0.9996
Coeficientes redondeados	
$a$	-1.233
$b$	0.9974
$c$	0.83
$d$	-0.3914

**Tabla 7:** Coeficientes para PFR con película controlante. Distribución e

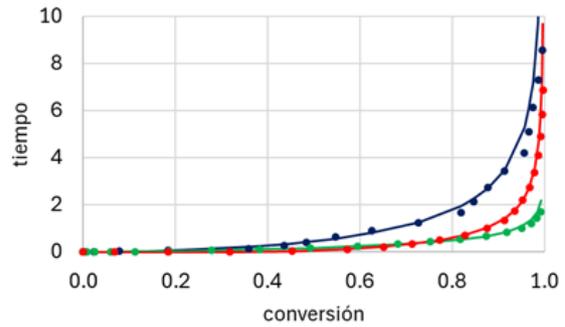
Bondad de ajuste	
$r^2$	0.9609
Coeficientes redondeados	
$a$	-2.8
$b$	1
$c$	0.0001
$d$	-0.14

**Tabla 8:** Coeficientes para PFR con reacción controlante. Distribución e

Bondad de ajuste	
$r^2$	0.9996
Coeficientes redondeados	
$a$	-1.679
$b$	1
$c$	0.0002
$d$	-0.0816

**Tabla 9:** Coeficientes para PFR con reacción controlante. Distribución e

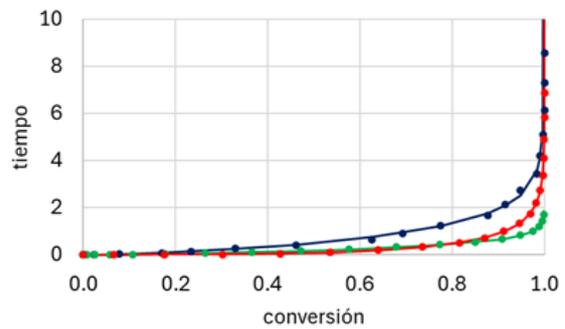
Bondad de ajuste	
$r^2$	0.9995
Coeficientes redondeados	
$a$	-21.3
$b$	21.4
$c$	2.99
$d$	-0.0317



**Figura 11:** Evaluación para PFR. Distribución a

**Tabla 10:** Coeficientes para PFR con película controlante. Distribución g

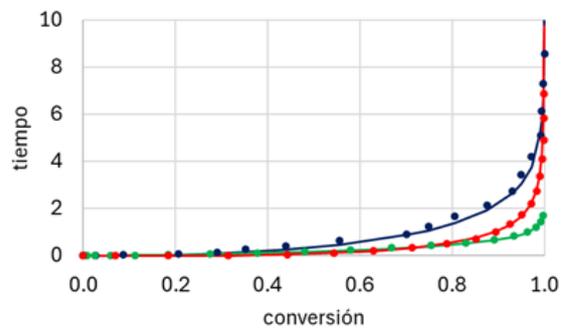
Bondad de ajuste	
$r^2$	0.9948
Coeficientes redondeados	
$a$	-33
$b$	33
$c$	1
$d$	-0.031



**Figura 12:** Evaluación para PFR. Distribución e

**Tabla 11:** Coeficientes para PFR con reacción controlante. Distribución g

Bondad de ajuste	
$r^2$	0.9999
Coeficientes redondeados	
$a$	-11.9
$b$	12.1
$c$	1
$d$	-0.0199



**Figura 13:** Evaluación para PFR. Distribución g

**Tabla 12:** Coeficientes para PFR con ceniza controlante. Distribución g

Bondad de ajuste	
$r^2$	0.9993
Coeficientes redondeados	
$a$	-2.162
$b$	2.003
$c$	1
$d$	-0.2234

De la Fig. 11 a la Fig. 13, se comparan las predicciones realizadas por las correlaciones (líneas) con los resultados de las simulaciones (círculos). Se consideraron las tres posibles resistencias controlantes: película (azul), reacción (verde) y ceniza (rojo). Las correlaciones tienen un error menor que el 10 % para conversiones mayores que 0.5.

### 6.2.2 Reactores perfectamente mezclados

Para los FBR y CSTR, la siguiente función fue la que produjo el mejor ajuste a los resultados de las simulaciones:

$$\bar{t}_d = a\hat{X}_B + b\hat{X}_B(1 - \hat{X}_B^c)^d \tag{16}$$

Los coeficientes de la ecuación anterior, obtenidos por regresión para los diferentes casos, se reportan desde la Tabla 13 a la Tabla 21. Esos coeficientes fueron redondeados considerando el error asociado a ellos. El ajuste fue casi perfecto de acuerdo con los valores del coeficiente  $r^2$ .

**Tabla 13:** Coeficientes para FBR y CSTR con película controlante. Distribución a

Bondad de ajuste	
$r^2$	1
Coeficientes redondeados	
<i>a</i>	-0.1566
<i>b</i>	0.039
<i>c</i>	0.036
<i>d</i>	-1

**Tabla 14:** Coeficientes para FBR y CSTR con reacción controlante. Distribución a

Bondad de ajuste	
$r^2$	1
Coeficientes redondeados	
<i>a</i>	0.0307
<i>b</i>	0.1715
<i>c</i>	0.55
<i>d</i>	-1

**Tabla 15:** Coeficientes para FBR y CSTR con ceniza controlante. Distribución a

Bondad de ajuste	
$r^2$	1
Coeficientes redondeados	
<i>a</i>	-6.429
<i>b</i>	7.025
<i>c</i>	8.93
<i>d</i>	-0.706

**Tabla 16:** Coeficientes para FBR y CSTR con película controlante. Distribución e

Bondad de ajuste	
$r^2$	1
Coeficientes redondeados	
<i>a</i>	0.2561
<i>b</i>	0.0404
<i>c</i>	0.051
<i>d</i>	-1

**Tabla 17:** Coeficientes para FBR y CSTR con reacción controlante. Distribución e

Bondad de ajuste	
$r^2$	1
Coeficientes redondeados	
<i>a</i>	0.0399
<i>b</i>	0.22464
<i>c</i>	0.7862
<i>d</i>	-1

**Tabla 18:** Coeficientes para FBR y CSTR con ceniza controlante. Distribución e

Bondad de ajuste	
$r^2$	1
Coeficientes redondeados	
<i>a</i>	-4.359
<i>b</i>	4.926
<i>c</i>	8.24
<i>d</i>	-0.682

**Tabla 19:** Coeficientes para FBR y CSTR con película controlante. Distribución g

Bondad de ajuste	
$r^2$	1
Coeficientes redondeados	
<i>a</i>	0.1607
<i>b</i>	0.0286
<i>c</i>	0.0308
<i>d</i>	-1

**Tabla 20:** Coeficientes para FBR y CSTR con reacción controlante. Distribución g

Bondad de ajuste	
$r^2$	1
Coeficientes redondeados	
<i>a</i>	0.0716
<i>b</i>	0.1391
<i>c</i>	0.4636
<i>d</i>	-1

**Tabla 21:** Coeficientes para FBR y CSTR con ceniza controlante. Distribución g

Bondad de ajuste	
$r^2$	1
Coeficientes redondeados	
<i>a</i>	-5.143
<i>b</i>	5.72
<i>c</i>	8.25
<i>d</i>	-0.6905

De la Fig. 14 a la Fig. 16, se comparan las predicciones realizadas por las correlaciones (líneas) con los resultados de las simulaciones (círculos). Se consideraron las tres posibles resistencias controlantes: película (azul), reacción (verde) y ceniza (rojo). Como puede apreciarse en esas figuras, el tiempo es poco sensible a bajas conversiones; pero altamente sensible a conversiones superiores a 0.8. Las correlaciones tienen un error menor que el 10% para conversiones mayores que 0.5.

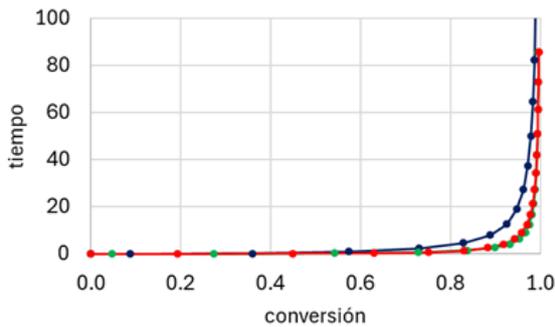


Figura 14: Evaluación para PBR y CSTR. Distribución a

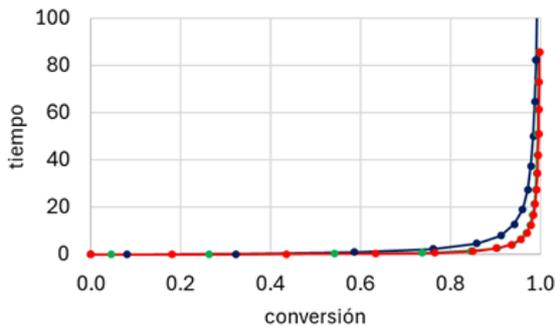


Figura 15: Evaluación para PBR y CSTR. Distribución e

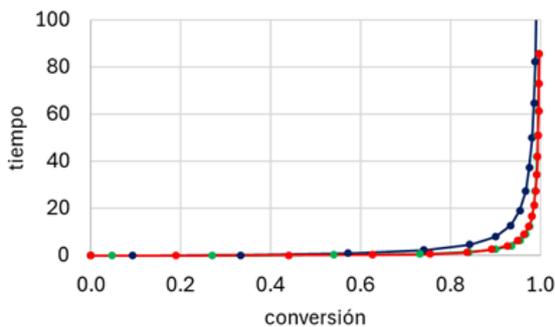


Figura 16: Evaluación para PBR y CSTR. Distribución g

### 6.3.1 Redes neuronales artificiales

De todas las estructuras probadas para la RNA, la feedforward backpropagation fue la que tuvo el menor error de prueba, con un error cuadrático medio del orden de  $10^{-6}$ . Esto ocurrió cuando la red fue configurada con una capa de entrada con una neurona, tres capas ocultas con 10 neuronas cada una, y una capa de salida con una neurona. La función de activación empleada en las neuronas de la capa oculta fue la tangente-sigmoide. En cambio, se empleó la función lineal en la única neurona de la capa de salida.

#### Reactores con flujo pistón

Para los PFR, de la Fig. 17 a la Fig. 19, se comparan las predicciones realizadas por las RNA (líneas) con los resultados de las simulaciones (círculos). Se consideraron las tres posibles resistencias controlantes: película (azul), reacción (verde) y ceniza (rojo). El ajuste fue casi perfecto, con errores menores que el 5% para conversiones mayores que 0.1. En el caso de la Fig. 17, el aspecto segmentado se debe a la poca cantidad de clases del histograma,  $c=5$ . Sin embargo, ese comportamiento solo se presenta cuando se tiene película controlante. Para los restantes casos, el aspecto de las curvas no se modifica con  $c \geq 5$ .

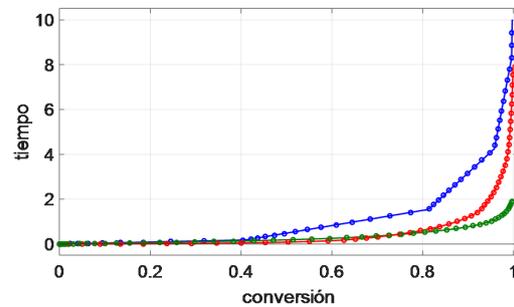


Figura 17: Evaluación para PFR. Distribución a

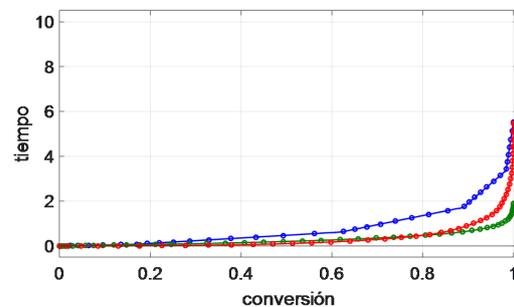


Figura 18: Evaluación para PFR. Distribución e

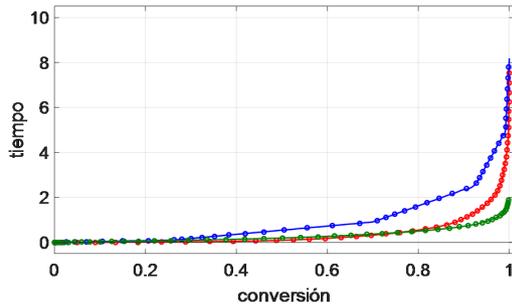


Figura 19: Evaluación para PFR. Distribución g

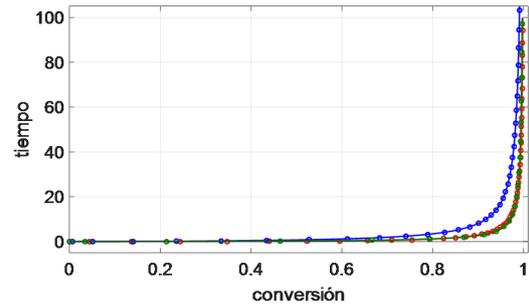


Figura 22: Evaluación para PBR y CSTR. Distribución g

### 6.3.2 Reactores perfectamente mezclados

Para los FBR y CSTR, de la Fig. 20 a la Fig. 22, se comparan las predicciones realizadas por las RNA (líneas) con los resultados de las simulaciones (círculos). Se consideraron las tres posibles resistencias controlantes: película (azul), reacción (verde) y ceniza (rojo). Como puede apreciarse en esas figuras, el tiempo es poco sensible a bajas conversiones; pero altamente sensible a conversiones mayores que 0.98. El ajuste fue casi perfecto, con errores menores que el 5 % para conversiones mayores que 0.1.

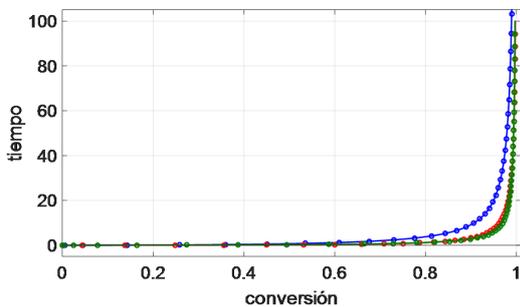


Figura 20: Evaluación para PBR y CSTR. Distribución a

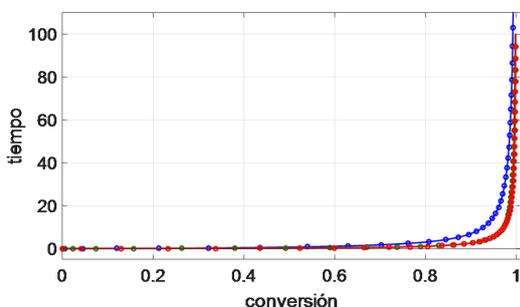


Figura 21: Evaluación para PBR y CSTR. Distribución e

### CONCLUSIONES

En este trabajo, se propusieron nuevas correlaciones para estimar el tiempo de residencia en función de la conversión para sistemas con partículas de diferentes tamaños donde el modelo de núcleo decreciente es aplicable. Se consideraron distintas resistencias controlantes para reactores con flujo pistón y para reactores perfectamente mezclados continuos. Se propuso una forma general para las correlaciones, y la misma fue evaluada para partículas con tres distribuciones de tamaño diferentes obtenidas experimentalmente. Para esas distribuciones, las correlaciones propuestas tienen un error menor que el 10 % para conversiones superiores a 0.5, lo que es suficiente para un diseño rápido o para los primeros pasos de una optimización.

Además, se desarrollaron tres RNA, una para cada distribución de tamaño experimental empleada para evaluar las correlaciones. Se probaron tres tipos distintos de RNA, de los cuales, el feed-forward backpropagation logró el mejor ajuste, con errores menores que el 5 % para conversiones mayores que 0.1. Si bien el desempeño de las RNA es superior al desempeño de las correlaciones propuestas, tienen el inconveniente de requerir un software especializado para su uso. Otro inconveniente, es que no se puede garantizar el cumplimiento de las condiciones matemáticas que se plantearon como deseables para las correlaciones.

Aunque los modelos simplificados desarrollados en el presente trabajo fueron ajustados para distribuciones de tamaño particulares, la función empleada para las correlaciones y la estructura usada para las RNA son un buen punto de partida para desarrollar modelos simplificados para otras distribuciones de tamaño.

**REFERENCIAS**

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Beale, M. H., Hagan, M. T. y Demuth, H. B. (2018). *Neural Network Toolbox™ User's Guide*. The MathWorks Inc. [https://ge0mlib.com/papers/Books/04\\_Neural\\_Network\\_Toolbox\\_Getting\\_Started\\_Guide.pdf](https://ge0mlib.com/papers/Books/04_Neural_Network_Toolbox_Getting_Started_Guide.pdf)
- Cybenko, G. (1989). Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 2(4), 303-314. <https://doi.org/10.1007/BF02551274>
- Devijver, P. A. y Kittler, J. (1982). *Pattern recognition: A statistical approach*. Prentice/Hall International.
- Froment, G. F., De Wilde, J. y Bischoff, K. B. (2011). *Chemical reactor analysis and design* (3rd ed). Wiley.
- Levenspiel, O. (2019). *Chemical reaction engineering* (3rd ed). Wiley.
- Lu, H., Guo, X., Liu, Y. y Gong, X. (2015). Effect of Particle Size on Flow Mode and Flow Characteristics of Pulverized Coal. *KONA Powder and Particle Journal*, 32(0), 143-153. <https://doi.org/10.14356/kona.2015002>
- Wen, C. Y. (1968). Noncatalytic heterogeneous solid-fluid reaction models. *Industrial & Engineering Chemistry*, 60(9), 34-54. <https://doi.org/10.1021/ie50705a007>
- Yagi, S. y Kunii, D. (1955). Studies on combustion of carbon particles in flames and fluidized beds. *Symposium (International) on Combustion*, 5(1), 231-244. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(55\)80033-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(55)80033-1)
- Yagi, S. y Kunii, D. (1961a). Fluidized-solids reactors with continuous solids feed—I: Residence time of particles in fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 16(3-4), 364-371. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(61\)80043-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(61)80043-2)
- Yagi, S. y Kunii, D. (1961b). Fluidized-solids reactors with continuous solids feed—II. *Chemical Engineering Science*, 16(3-4), 372-379. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(61\)80044-4](https://doi.org/10.1016/0009-2509(61)80044-4)

## NUEVAS CORRELACIONES PARA ESTIMAR EL TIEMPO DE RESIDENCIA PARA REACCIONES FLUIDO-SÓLIDO

Tarifa, Enrique E.<sup>1 2</sup>; Vera, Carlos R.<sup>2 3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.

<sup>2</sup> CONICET.

<sup>3</sup> Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica (FIQ-UNL, CONICET).

\* [etarifa@fi.unju.edu.ar](mailto:etarifa@fi.unju.edu.ar); [cvera@fiq.unl.edu.ar](mailto:cvera@fiq.unl.edu.ar)

**RESUMEN:** La estimación del tiempo de residencia requerido para lograr una conversión deseada en una reacción fluido-sólido demanda una alta carga computacional. Para subsanar este problema, existen correlaciones que permiten estimar dicho tiempo con menor esfuerzo. En este trabajo, se revisan esas correlaciones para el caso de reacciones heterogéneas que pueden ser representadas con el modelo de núcleo decreciente, con resistencia controlante en la transferencia de masa a través de la película, en la reacción química o en la difusión a través de la ceniza. Para un tamaño de partícula único, se proponen nuevas correlaciones para resolver el problema de la inexactitud y la falta de solución analítica de las correlaciones tradicionalmente utilizadas. Las correlaciones que se proponen fueron desarrolladas para reactores con flujo pistón y para reactores perfectamente mezclados continuos. Por otra parte, se estudió cómo emplear las correlaciones propuestas cuando el tamaño de las partículas no es uniforme. Para ello, se emplearon distribuciones de tamaños experimentales disponibles en bibliografía. La exactitud de los resultados obtenidos es suficiente para un diseño rápido de reactores o para los primeros pasos de un algoritmo de optimización.

**Palabras claves:** Tiempo de residencia, núcleo decreciente, correlaciones.

**ABSTRACT:** The estimation of the residence time required to achieve a desired conversion in a fluid-solid reaction is computationally demanding. To overcome this problem, there are correlations that allow estimating the residence time with less effort. In this paper, those correlations are reviewed for the case of heterogeneous reactions that can be represented with the shrinking core model, with controlling resistance in mass transfer through the film, in the chemical reaction or in diffusion through the ash. For a single particle size, new correlations are proposed to solve the problem of inaccuracy and lack of analytical solution of traditionally used correlations. The proposed correlations were developed for piston flow reactors and for continuous perfectly mixed reactors. Moreover, it was studied how to use the proposed correlations when the particle size is not uniform. Experimental size distributions available in the literature were used for this purpose. The accuracy of the obtained results is enough for a fast reactor design or for the first steps of an optimization algorithm.

**Keywords:** Residence time, shrinking core, correlations.

### INTRODUCCIÓN

Las reacciones fluido-sólido tienen un importante rol en la industria química. Por ese motivo, es de gran interés desarrollar modelos que permitan caracterizarlas adecuadamente. Uno de los primeros estudios acerca de los aspectos generales de ese tipo de reacciones fue el de Wen (1968). En ese trabajo, se identifican tres tipos de sistemas: (i) un sistema con un frente de reacción definido y un núcleo sin reaccionar que se contrae, (ii) un sistema homogéneo sin gradientes, (iii) un sistema con gradiente en la concentración del fluido y en la del sólido.

El primero de esos casos se denomina modelo de núcleo decreciente, SCM por sus siglas en inglés (shrinking-core model). Ese modelo representa adecuadamente a una amplia variedad de reacciones que cumplen con una de las siguientes condiciones: (i) el sólido no es poroso, (ii) el sólido es poroso pero la resistencia de la reacción química es pequeña en comparación a la resistencia de la difusión del fluido (proceso con

control difusivo). En el SCM, la reacción ocurre en la superficie del núcleo que aún no reaccionó, y este se contrae a medida que avanza la reacción consumiendo al reactivo y dejando atrás una capa de ceniza. Entre las reacciones que pueden ser representadas con ese modelo, se encuentran la combustión del carbón, la tostación de blenda, reacciones líquido-sólido y reacciones gas-sólido (Yagi & Kunii, 1955).

El SCM se emplea para estimar el tiempo de residencia requerido para alcanzar una dada conversión, y viceversa. En algunos casos, es posible obtener una solución analítica; pero en otros, la mayoría, se debe recurrir a la resolución numérica, con la consiguiente carga computacional que ello implica.

Lo planteado motivó el desarrollo de correlaciones para estimar las variables de interés sin tener que emplear un método numérico. Yagi and Kunii (1961a, 1961b) y Levenspiel (2019) presentaron correlaciones que son tradicionalmente empleadas en el cálculo de reactores. Sin embargo, esas correlaciones son inexactas en algunos casos.

Además, fueron desarrolladas para estimar la conversión en función del tiempo de residencia. Cuando se desea estimar el tiempo de residencia en función de la conversión, no tienen solución analítica.

En el presente trabajo, se revisan esas correlaciones para el caso de reacciones heterogéneas que pueden ser representadas con el SCM, con resistencia controlante en la transferencia de masa a través de la película, en la reacción química o en la difusión a través de la ceniza. Para un tamaño de partícula único, se proponen nuevas correlaciones para resolver el problema de la inexactitud y la falta de solución analítica. Las correlaciones que se proponen fueron desarrolladas para reactores con flujo pistón y para reactores perfectamente mezclados continuos. Para los primeros, los PFR (plug flow reactors), las correlaciones son las mismas que se emplean para una sola partícula. En cambio, para los segundos, tales como los FBR (fluidized-bed reactors) y los CSTR (continuous stirred tank reactor) se debe tener en cuenta la distribución del tiempo de residencia. Finalmente, para ambos tipos de reactores, se estudió cómo emplear las correlaciones propuestas cuando el tamaño de las partículas no es uniforme.

**MODELO DE NÚCLEO DECRECIENTE**

En el SCM, la reacción ocurre inicialmente en la superficie de la partícula de radio  $R_0$ ; luego, el frente de reacción va avanzando hacia el interior de la partícula. El núcleo que queda sin reaccionar, con radio  $r_c$ , va disminuyendo su tamaño, dejando atrás una capa de ceniza. En este proceso, el tamaño de la partícula se mantiene constante. La Fig. 1 presenta la evolución del perfil de concentración  $C_B$  del sólido a medida que el frente de reacción avanza con el tiempo. La Fig. 2 presenta el perfil de la concentración  $C_A$  del fluido, en este caso un gas.  $C_{Ag}$  es la concentración en el entorno,  $C_{As}$  es la concentración en  $r = R_0$ , y  $C_{Ac}$  es la concentración en  $r = r_c$ .

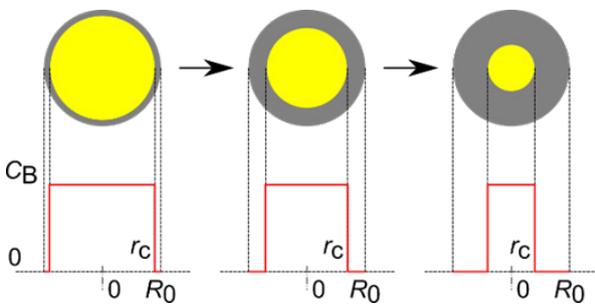


Figura 1: Concentración del sólido B en el SCM

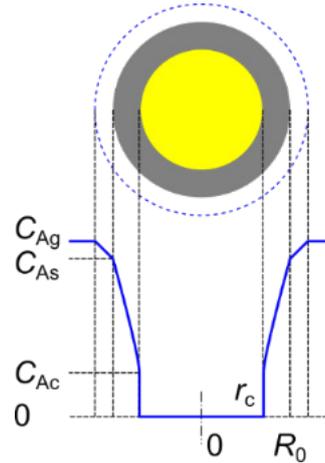


Figura 2: Concentración del fluido A en el SCM

Para una reacción  $A_{(g)} + bB_{(s)} \rightarrow rR_{(g)} + pP_{(s)}$ , el SCM considera las resistencias asociadas a las siguientes etapas: (i) difusión del gas A desde el entorno de la partícula a la superficie de esta a través de la película de gas que la rodea, (ii) difusión de A a través de la capa de ceniza hacia la zona de reacción, (iii) reacción química en la superficie del núcleo que queda sin reaccionar, (iv) difusión del producto gaseoso R de la reacción a través de la capa de ceniza hacia la superficie externa de la partícula, (v) difusión del producto gaseoso a través de la película de gas que rodea a la partícula hacia el entorno.

Las principales hipótesis del SCM son las siguientes: (a) el reactivo B no es poroso, (b) el producto P es poroso, (c) cada etapa de transferencia de materia y reacción es una resistencia en serie para la velocidad global de reacción, (d) la etapa más lenta es la controlante, (e) el reactivo A está en exceso y su concentración en el entorno es constante, (f) las partículas son esféricas, (g) el proceso es isotérmico, (h) la densidad del sólido es constante, (i) la velocidad de contracción del núcleo que permanece sin reaccionar es mucho menor que la velocidad de difusión a través de la capa de ceniza.

En la bibliografía comúnmente empleada para el cálculo de reactores (Froment et al., 2011; Levenspiel, 2019), se presentan ecuaciones que permiten el cálculo de la velocidad global de reacción cuando alguna de las resistencias del modelo es la controlante. De ese modo, se tienen las correspondientes ecuaciones para película controlante, reacción controlante y ceniza controlante.

## PARTÍCULAS UNIFORMES

### 3.1 Reactores con flujo pistón

El SCM fue aplicado en el estudio de partículas aisladas. Los resultados de ese estudio se pueden emplear en el diseño de PFR considerando que cada volumen diferencial contiene partículas con tamaño y tiempo de residencia uniforme. A continuación, se presentan las ecuaciones producidas por el SCM cuando se identifican distintas resistencias controlantes.

#### Película controlante

La Fig. 3 muestra el perfil de concentración del fluido cuando la transferencia de masa a través de la película que rodea a la partícula es mucho más lenta que la difusión a través de la capa de ceniza y que la reacción química. Es decir, se tiene que la resistencia controlante es la correspondiente a la película.

#### 3.1.1 Película controlante

La Fig. 3 muestra el perfil de concentración del fluido cuando la transferencia de masa a través de la película que rodea a la partícula es mucho más lenta que la difusión a través de la capa de ceniza y que la reacción química. Es decir, se tiene que la resistencia controlante es la correspondiente a la película.

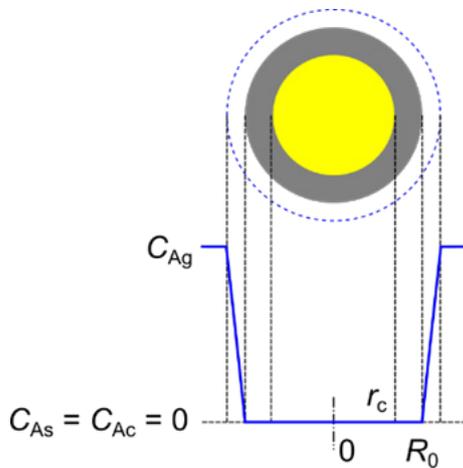


Figura 3: Concentración del fluido A para película controlante

En este caso, el SCM tiene solución analítica:

$$\frac{t}{\tau} = X_B \quad (1)$$

Donde  $X_B$  es la conversión del sólido,  $t$  es el tiempo de reacción, y  $\tau$  es el tiempo requerido para conversión completa del sólido.

#### 3.1.2 Reacción controlante

La Fig. 4 muestra el perfil de concentración del fluido cuando la reacción química es mucho más lenta que la transferencia de masa a través de la película que rodea a la partícula y que la difusión a través de la capa de ceniza. Es decir, se tiene que la resistencia controlante es la correspondiente a la reacción.

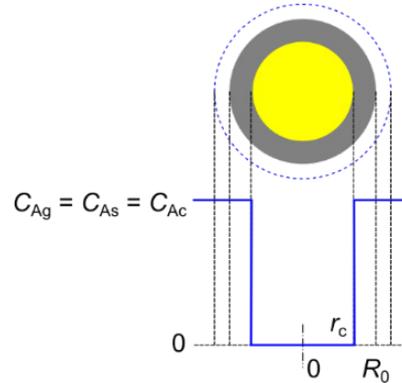


Figura 4: Concentración del fluido A para reacción controlante

En este caso, el SCM tiene solución analítica para el tiempo:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_B)^{1/3} \quad (2)$$

Sin embargo, para obtener  $X_B$ , se deben obtener las tres soluciones de la ecuación anterior y evaluarlas para determinar cuál de ellas es la que tiene sentido físico.

#### 3.1.3 Ceniza controlante

La Fig. 5 muestra el perfil de concentración del fluido cuando la difusión a través de la capa de ceniza es mucho más lenta que la transferencia de masa a través de la película que rodea a la partícula y que la reacción química. Es decir, se tiene que la resistencia controlante es la correspondiente a la ceniza.

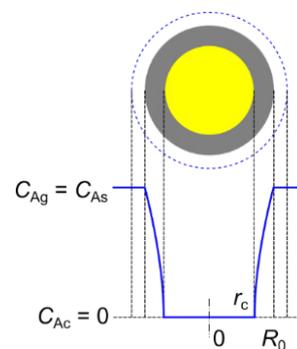


Figura 5: Concentración del fluido A para ceniza controlante

En este caso, el SCM tiene solución analítica para el tiempo:

$$\bar{X}_B = \int_0^\tau X_B(t) E(t) dt \tag{4}$$

$$E(t) = \frac{e^{-\frac{t}{\bar{t}}}}{\bar{t}} \tag{5}$$

Donde E(t) es la distribución de tiempos de residencia de las partículas en el reactor.

Debido a que no siempre es posible resolver en forma analítica las ecuaciones anteriores, o con el fin de simplificarlas cuando pueden obtenerse esas soluciones, se emplean series de Taylor para aproximar a las soluciones correspondientes a distintas resistencias controlantes (Levenspiel, 2019; Yagi & Kunii, 1961a, 1961b). A continuación, se presentan las soluciones analíticas y sus aproximaciones para las distintas resistencias controlantes. En el caso de ceniza controlante, no es posible obtener la solución analítica. Tampoco es posible obtener la solución analítica para el tiempo en ninguno de los casos.

Película controlante:

$$\bar{X}_B = \frac{\bar{t}}{\tau} (1 - e^{-\tau/\bar{t}}) \tag{6}$$

$$\bar{X}_B = 1 - \frac{1}{2} \frac{\tau}{\bar{t}} + \frac{1}{3!} \left(\frac{\tau}{\bar{t}}\right)^2 - \frac{1}{4!} \left(\frac{\tau}{\bar{t}}\right)^3 + \dots \tag{7}$$

Reacción controlante:

$$\bar{X}_B = 3 \frac{\bar{t}}{\tau} - 6 \left(\frac{\bar{t}}{\tau}\right)^2 + 6 \left(\frac{\bar{t}}{\tau}\right)^3 (1 - e^{-\tau/\bar{t}}) \tag{8}$$

$$\bar{X}_B = 1 - \frac{1}{4} \frac{\tau}{\bar{t}} + \frac{1}{20} \left(\frac{\tau}{\bar{t}}\right)^2 - \frac{1}{120} \left(\frac{\tau}{\bar{t}}\right)^3 + \dots \tag{9}$$

Ceniza controlante:

$$\bar{X}_B = 1 - \frac{1}{5} \frac{\tau}{\bar{t}} + \frac{19}{420} \left(\frac{\tau}{\bar{t}}\right)^2 - \frac{41}{4620} \left(\frac{\tau}{\bar{t}}\right)^3 + 1.49 \times 10^{-3} \left(\frac{\tau}{\bar{t}}\right)^4 - \dots \tag{10}$$

El uso de las aproximaciones presentadas está ampliamente difundido en el diseño de reactores. Sin embargo, esas aproximaciones son inexactas para valores bajo de conversión. Además, el cálculo del tiempo para una conversión deseada

a partir de ellas requiere una solución numérica.

### PARTÍCULAS NO UNIFORMES

Cuando las partículas alimentadas al reactor no tienen un tamaño uniforme, la distribución de tamaños puede ser representada por una distribución discreta provista por un sistema de tamizado, tal como la que se muestra en la Fig. 6. En el histograma de esa figura,  $F_0(R_{0i})$  es el caudal de alimentación de sólidos correspondiente a la clase de partículas con radio medio  $R_{0i}$ . Por lo tanto, se tiene:

$$F_0 = \sum_{i=1}^m F_0(R_{0i}) \tag{11}$$

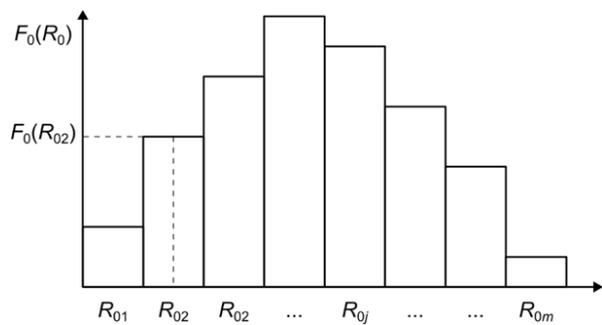


Figura 6: Histograma de radios de partículas

En este caso, la conversión media para un PFR puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\hat{X}_B = \sum_{i=1}^m X_B(R_{0i}) F_0(R_{0i}) / F_0 \tag{12}$$

En cambio, la conversión media para un FBR o un CSTR es:

$$\hat{X}_B = \sum_{i=1}^m \bar{X}_B(R_{0i}) F_0(R_{0i}) / F_0 \tag{13}$$

Nuevamente, las expresiones obtenidas para la conversión media son bastante complejas, y el cálculo del tiempo de reacción requiere el empleo de un método numérico.

### MÉTODO

En esta sección, se explica el método empleado para el caso de un reactor perfectamente mezclado continuos. El mismo método fue aplicado a un PFR, pero usando  $X_B$  y  $td = t/\tau$  en lugar de  $\bar{X}_B$  y  $t_d = t/\bar{\tau}$ , respectivamente. Para simplificar las expresiones obtenidas, se emplea el tiempo

adimensional  $t_d$  y el tiempo adimensional promedio  $\bar{t}_d$ .

Para cada caso estudiado, se evaluó la correspondiente solución analítica de  $X_B$  para generar una tabla de valores de  $X_B$  vs.  $t_d$ . Luego, a los datos de la tabla, se ajustaron por regresión la correlación propuesta para calcular  $t_d$  en función de  $X_B$ . Se probaron una variedad de funciones que fueron evaluadas con el AIC (*Akaike's Information Criterion*). La función con el menor valor de AIC es la mejor. Ese criterio favorece a las funciones más simples sobre aquellas con más parámetros (Akaike, 1974). Las funciones probadas fueron escogidas observando el cumplimiento de las siguientes condiciones matemáticas:

$$\bar{X}_B \text{ es siempre creciente con } \bar{t}_d, \\ \bar{X}_B \in [0,1], \lim_{\bar{t}_d \rightarrow 0^+} \bar{X}_B = 0 \text{ y } \lim_{\bar{t}_d \rightarrow \infty} \bar{X}_B = 1.$$

Los coeficientes de las funciones seleccionadas fueron redondeados considerando el error asociado a ellos. Para evaluar el ajuste, se empleó el coeficiente de determinación  $r^2$  y el error estándar SE de los residuos. Además, se graficó  $X_B$  ( $t_d(X)$ ) vs.  $X$ . Esto es, para un dado valor de conversión  $X$ , se empleó la correlación a evaluar para estimar el tiempo adimensional  $t_d(X)$ ; luego, se usó la correspondiente solución analítica para calcular la conversión  $X_B(t_d(X))$ . De esta manera, mientras mejor sea la correlación propuesta para  $t_d$ , más cerca estará  $X_B(t_d(X))$  a  $X$ ; es decir, más se acercará la gráfica al segmento de 45° entre (0,0) y (1,1).

Para realizar la regresión, se adoptó el criterio de mínimos cuadrados. Es decir, la función objetivo fue la suma de los errores cuadráticos. En algunos casos, los errores fueron ponderados por un factor para mejorar el ajuste a valores bajo de tiempo.

Para partículas con diferentes tamaños, se asumió que la función de masa de probabilidad pmf (probability mass function) era conocida. De esa manera, se contó con  $c$  pares ordenados  $(R_{0i}, p_i)$ , donde  $p_i$  es la probabilidad de que una partícula pertenezca a la clase con radio medio  $R_{0i}$ . Esta probabilidad es igual a la fracción másica o volumétrica de las partículas pertenecientes a la clase considerada.

Los  $\tau_i$  fueron calculados considerando la resistencia controlante (Levenspiel, 2019).

Película controlante:

$$\tau = \alpha R_0^{1.5-2} \tag{14}$$

Reacción controlante:

$$\tau = \alpha R_0 \tag{15}$$

Ceniza controlante:

$$\tau = \alpha R_0^2 \tag{16}$$

La conversión media  $\hat{X}_B$  para un dado tiempo de residencia promedio  $\bar{t}$  fue calculada considerando la distribución de tamaños de partículas y la solución correspondiente a la resistencia controlante:

$$\hat{X}_B = \sum_{i=1}^c \bar{X}_B \left( \frac{\bar{t}}{\tau_i} \right) p_i \tag{17}$$

Para determinar el tiempo  $\bar{t}$  requerido para alcanzar una dada conversión  $\hat{X}_B$ , se debe resolver numéricamente la ecuación anterior. En esa tarea, el empleo de las correlaciones propuestas en este trabajo para  $\hat{X}_B$  puede reducir notablemente el esfuerzo computacional sin afectar la exactitud del resultado. Ello no es posible con las aproximaciones presentadas por Yagi y Kunii (1961a, 1961b) y Levenspiel (2019) porque son complejas e inexactas para valores bajos de tiempo.

Otra alternativa, con menor costo computacional, que se propone en este trabajo para estimar el tiempo en función de la conversión es el empleo de un modelo simplificado:

1. Calcular el tiempo promedio para conversión completa:  $\hat{\tau} = \prod_{i=1}^c \tau_i^{p_i}$ .
2. Para un valor deseado  $X$  para la conversión media  $\hat{X}_B$ , estimar el tiempo adimensional usando la correlación propuesta en este trabajo para  $\bar{t}_d(X)$ , considerando la resistencia controlante.
3. Estimar el tiempo de residencia requerido:  $\bar{t} = \hat{\tau} \bar{t}_d(X)$ .
4. Verificar la calidad de la estimación calculando  $\hat{X}_B(\bar{t})$  considerando la resistencia controlante.

Esta aproximación afecta a la exactitud de los resultados; pero simplifica los cálculos. Por lo tanto, es adecuada para un diseño rápido o para los primeros pasos de un procedimiento de optimización.

El procedimiento descrito es independiente del valor de  $\alpha$  empleado para calcular los  $\tau_i$ ; por ese

motivo, se le asignó el valor 1. Tal independencia se prueba a continuación:

$$\tau_i = \alpha R_{0i}^\beta \tag{18}$$

$$\hat{\tau} = \prod_{i=1}^c \tau_i^{p_i} = \alpha \prod_{i=1}^c R_{0i}^{\beta p_i} \tag{19}$$

$$\bar{\tau} = \hat{\tau} \bar{t}_d(X) = \bar{t}_d(X) \alpha \prod_{j=1}^c R_{0j}^{\beta p_j} \tag{20}$$

$$\begin{aligned} \hat{X}_B &= \sum_{i=1}^c \bar{X}_B \left( \frac{\bar{\tau}}{\tau_i} \right) p_i \\ &= \sum_{i=1}^c \bar{X}_B \left( \bar{t}_d(X) R_{0i}^{-\beta} \prod_{j=1}^c R_{0j}^{\beta p_j} \right) p_i \end{aligned} \tag{21}$$

## RESULTADOS

### 6.1 Partículas uniformes

#### 6.1.1 Reactores con flujo pistón

Para los PFR, se puede obtener la solución analítica para cualquier resistencia controlante. Película controlante:

$$t_d = X_B \tag{22}$$

Reacción controlante:

$$t_d = 1 - (1 - X_B)^{1/3} \tag{23}$$

$$X_B = 1 - (1 - t_d)^3 \tag{24}$$

Ceniza controlante:

$$t_d = 1 - 3(1 - X_B)^{2/3} + 2(1 - X_B) \tag{25}$$

En este trabajo, se obtuvo la solución analítica para  $X_B$  resolviendo la ecuación anterior e identificando la solución real de las múltiples soluciones que existen. La solución real conseguida es la siguiente:

$$X_B = X_1 + X_2 + X_3 \tag{26}$$

$$\begin{aligned} \gamma &= -8t_d^2 + 8\sqrt{t_d^4 - 3t_d^3 + 3t_d^2 - t_d} \\ &\quad - 20t_d + 1 \end{aligned} \tag{27}$$

$$X_1 = \frac{(1 - i\sqrt{3})(-648t_d - 81)}{432^3\sqrt{\gamma}} \tag{28}$$

$$X_2 = -\frac{3}{16}(1 + i\sqrt{3})^3\sqrt{\gamma} \tag{29}$$

$$X_3 = \frac{1}{8}(3 - 4t_d) \tag{30}$$

Dada la complejidad de la solución analítica, se elaboró la siguiente correlación para reemplazarla:

$$X_B = \left( \frac{3.19}{2.19 + t_d^{-1.46}} \right)^{0.32} \tag{31}$$

En la Fig. 7, se puede apreciar que el ajuste logrado con la correlación propuesta es adecuado.

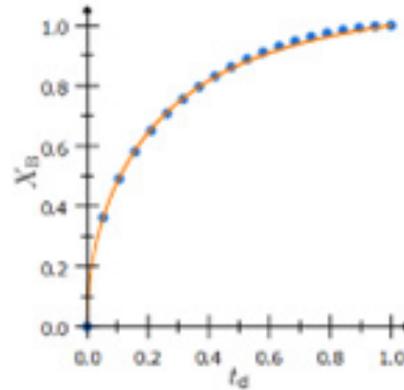


Figura 7: Comparación entre la solución analítica (círculos azules) y la correlación propuesta para  $X_B$  (línea naranja). Película controlante. PFR

#### 6.1.2 Reactores perfectamente mezclados

Para los reactores perfectamente mezclados continuos, considerando el caso de película controlante, la Fig. 8 muestra que la aproximación tradicionalmente empleada para  $X_B$  tiene un error creciente para  $t_d \leq 1$  o  $X_B \leq 0.63$ .

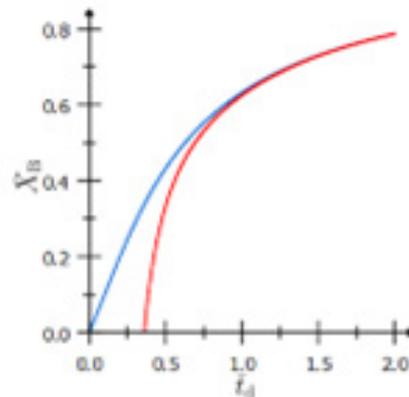
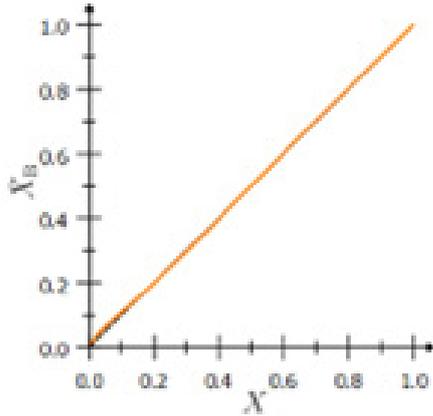


Figura 8: Comparación entre la solución analítica (línea azul, ec. (6)) y la aproximación tradicional para  $X_B$  (línea roja, ec. (7)). Película controlante. FBR y CSTR



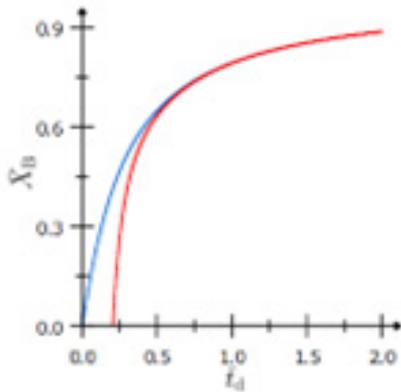
**Figura 9:** Evaluación de la correlación propuesta para  $\bar{t}_d$ . El objetivo es la línea de trazos. Película controlante. FBR y CSTR

Debido a ese error y a la imposibilidad de obtener  $\bar{t}_d$  analíticamente, se desarrolló la siguiente correlación:

$$\bar{t}_d = 0.079\bar{X}_B - \frac{0.31}{1 - \bar{X}_B^{-0.61}} \quad (32)$$

La Fig. 9 presenta la evaluación de la correlación propuesta. Debido a que la línea obtenida (línea naranja) se superpone al segmento de 45° (línea de trazos), la correlación propuesta es adecuada para todo el rango de conversión.

Para el caso de reacción controlante, de acuerdo con la Fig. 10, la aproximación tradicionalmente empleada para  $\bar{X}_B$  tiene un error creciente para:  $\bar{t}_d \leq 0.75$  or  $\bar{X}_B \leq 0.74$ .



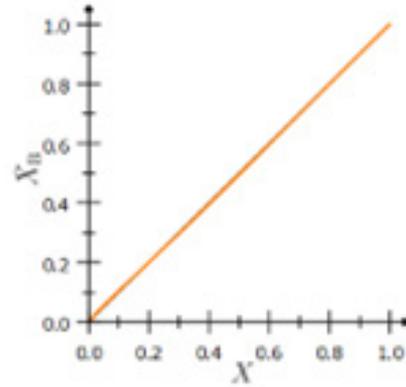
**Figura 10:** Comparación entre la solución analítica (línea azul, ec. (8)) y la aproximación tradicional para  $\bar{X}_B$  (línea roja, ec. (9)). Reacción controlante. FBR y CSTR

Debido a ese error y a la imposibilidad de obtener  $\bar{t}_d$  analíticamente, se desarrolló la siguiente

correlación:

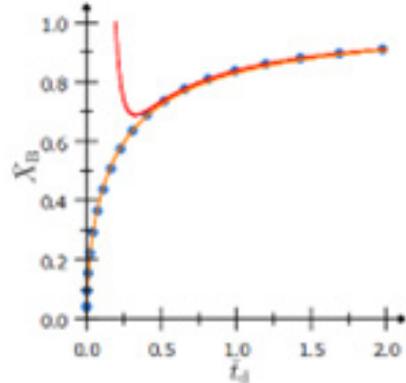
$$\bar{t}_d = 0.033\bar{X}_B - \frac{0.214}{1 - \bar{X}_B^{-0.86}} \quad (33)$$

La Fig. 11 presenta la evaluación de la correlación propuesta. La correlación propuesta es adecuada para todo el rango de conversión.



**Figura 11:** Evaluación de la correlación propuesta para  $\bar{t}_d$ . El objetivo es la línea de trazos. Reacción controlante. FBR y CSTR

Para el caso de ceniza controlante, de acuerdo con la Fig. 12, la aproximación tradicionalmente empleada para  $\bar{X}_B$  tiene un error creciente para  $\bar{t}_d \leq 0.5$  o  $\bar{X}_B \leq 0.73$ .

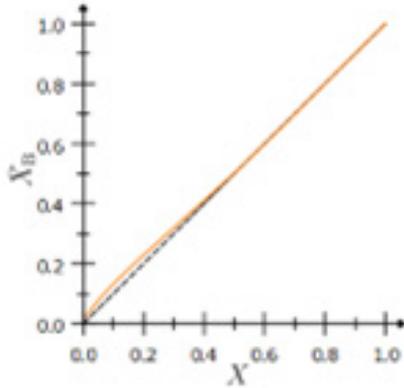


**Figura 12:** Comparación entre la solución analítica (círculos azules, ec. (4)), la aproximación tradicional (línea roja, ec. (10)) y la correlación propuesta para  $\bar{X}_B$  (línea naranja, ec. (35)). Ceniza controlante. FBR y CSTR

Debido a ese error y a la imposibilidad de obtener  $\bar{t}_d$  analíticamente, se desarrolló la siguiente correlación:

$$\bar{t}_d = 0.02\bar{X}_B - \frac{0.37}{1 - \bar{X}_B^{-1.8}} \quad (34)$$

La Fig. 13 presenta la evaluación de la correlación propuesta. La correlación propuesta es adecuada para todo el rango de conversión; pero con menor exactitud para  $\bar{X}_B \leq 0.4$ .



**Figura 13:** Evaluación de la correlación propuesta para  $\bar{t}_d$ . El objetivo es la línea de trazos. Ceniza controlante. FBR y CSTR

Dada la carga computacional que demanda el cálculo numérico de  $\bar{X}_B$ , se desarrolló la siguiente correlación:

$$\bar{X}_B = 1 - \frac{1}{(1 + \bar{t}_d^{0.619})^{2.564}} \tag{35}$$

En la Fig. 12, se puede apreciar que la correlación propuesta concuerda con la solución numérica.

### 6.2 Partículas no uniformes

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar el método simplificado propuesto para el caso en que la alimentación del reactor contenga partículas de diferentes tamaños. Para ello, se tomó como caso de estudio a las distribuciones de tamaño experimentales reportadas por Lu et al. (2015). Dichas distribuciones tienen un diámetro medio de partícula en el intervalo [18  $\mu\text{m}$ , 224  $\mu\text{m}$ ]. Dos de las distribuciones seleccionadas, la a y la g, corresponden a los tamaños extremos de partículas; la tercera, la e, corresponde a tamaños intermedios. De la Tabla 1 a la Tabla 3, se presentan las distribuciones seleccionadas. Los 3 histogramas considerados tienen 5 clases. Para cada clase, se indican el radio medio  $R_0$  y la probabilidad  $p$  (igual a la fracción volumétrica de la clase).

**Tabla 1:** Distribución a empleada como caso de estudio (Lu et al., 2015)

$i$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$
1	4.64	0.3565
2	13.61	0.3735
3	22.58	0.1878
4	31.55	0.0715
5	40.52	0.0107

**Tabla 2:** Distribución e empleada como caso de estudio (Lu et al., 2015)

$i$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$
1	15.18	0.1039
2	45.14	0.3637
3	75.10	0.3227
4	105.06	0.1679
5	135.02	0.0418

**Tabla 3:** Distribución g empleada como caso de estudio (Lu et al., 2015)

$i$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$
1	50.18	0.2039
2	150.14	0.3706
3	250.10	0.2801
4	350.06	0.1241
5	450.02	0.0213

6.2.1 Reactores con flujo pistón

Para los PFR, la Tabla 4 presenta los parámetros del modelo simplificado correspondientes al caso de película controlante. La Fig. 14 presenta la evaluación del método propuesto para las tres distribuciones adoptadas como caso de estudio. En este caso, el error de los resultados es apreciable. La apariencia segmentada de las líneas se debe al bajo número de clases considerados en los histogramas. Cuando el valor de  $c$  se incrementa, las líneas se hacen más suaves. Esta sensibilidad al número de clases solo se observó para este caso de estudio, los otros casos son prácticamente independiente de  $c$  para  $c \geq 5$ .

Tabla 4: Parámetros del modelo simplificado para película controlante

$\alpha$	$\beta$	$\tau_m$ de a	$\tau_m$ de e	$\tau_m$ de g
1	2	119.9421	3284.2675	24808.9366

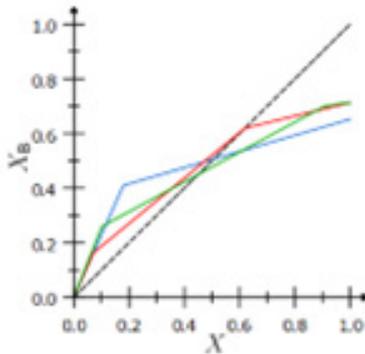


Figura 14: Evaluación para la distribución a (línea azul), la e (línea roja) y la g (línea verde). Película controlante. PFR

La Tabla 5 presenta los parámetros del modelo simplificado para el caso de reacción controlante. La Fig. 15 presenta la evaluación del método propuesto para las tres distribuciones adoptadas como caso de estudio. En este caso, los resultados obtenidos con el método simplificado son aceptables.

Tabla 5: Parámetros del modelo simplificado para reacción controlante

$\alpha$	$\beta$	$\tau_m$ de a	$\tau_m$ de e	$\tau_m$ de g
1	1	10.9518	57.3085	157.5085

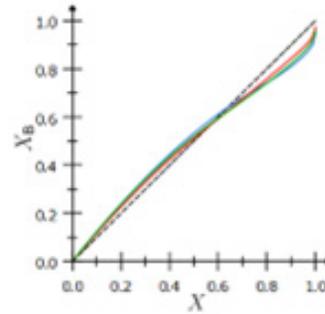


Figura 15: Evaluación para la distribución a (línea azul), la e (línea roja) y la g (línea verde). Reacción controlante. PFR

La Tabla 6 presenta los parámetros del modelo simplificado para el caso de ceniza controlante. La Fig. 16 presenta la evaluación del método propuesto para las tres distribuciones adoptadas como caso de estudio. En este caso, los resultados obtenidos con el método simplificado son aceptables. Sin embargo, se observa un error creciente para valores altos de conversión.

Tabla 6: Parámetros del modelo simplificado para ceniza controlante

$\alpha$	$\beta$	$\tau_m$ de a	$\tau_m$ de e	$\tau_m$ de g
1	2	119.9421	3284.2675	24808.9366

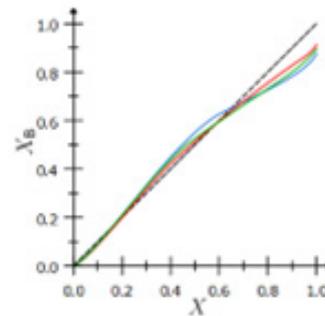


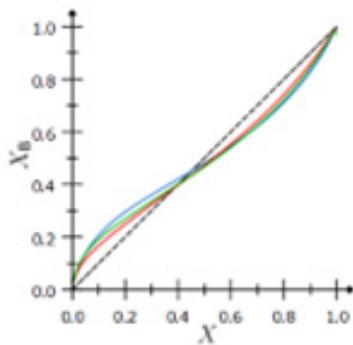
Figura 16: Evaluación para la distribución a (línea azul), la e (línea roja) y la g (línea verde). Ceniza controlante. PFR

**6.2.2 Reactores perfectamente mezclados**

Para los reactores perfectamente mezclados continuos, la Tabla 7 presenta los parámetros del modelo simplificado correspondientes al caso de película controlante. La Fig. 17 presenta la evaluación del método propuesto para las tres distribuciones adoptadas como caso de estudio. En este caso, los resultados obtenidos son regulares. Se observa que los mayores errores ocurren para valores de conversión cercanos a 0.2 y 0.8.

**Tabla 7:** Parámetros del modelo simplificado para película controlante

$\alpha$	$\beta$	$\tau_m$ de a	$\tau_m$ de e	$\tau_m$ de g
1	2	119.9421	3284.2675	24808.9366

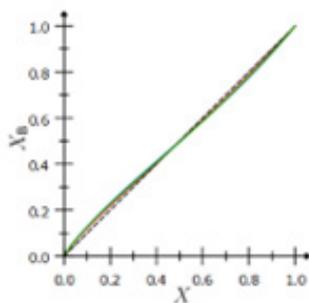


**Figura 17:** Evaluación para la distribución a (línea azul), la e (línea roja) y la g (línea verde). Película controlante. FBR y CSTR

La Tabla 8 presenta los parámetros del modelo simplificado para el caso de reacción controlante. La Fig. 18 presenta la evaluación del método propuesto para las tres distribuciones adoptadas como caso de estudio. En este caso, los resultados obtenidos con el método simplificado son aceptables para todas las distribuciones.

**Tabla 8:** Parámetros del modelo simplificado para reacción controlante

$\alpha$	$\beta$	$\tau_m$ de a	$\tau_m$ de e	$\tau_m$ de g
1	1	10.9518	57.3085	157.5085

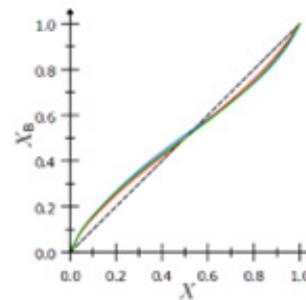


**Figura 18:** Evaluación para la distribución a (línea azul), la e (línea roja) y la g (línea verde). Reacción controlante. FBR y CSTR

La Tabla 9 presenta los parámetros del modelo simplificado para el caso de ceniza controlante. La Fig. 19 presenta la evaluación del método propuesto para las tres distribuciones adoptadas como caso de estudio. En este caso, los resultados obtenidos con el método simplificado son regulares. Los mayores errores ocurren para valores de conversión cercanos a 0.2 y 0.8.

**Tabla 9:** Parámetros del modelo simplificado para ceniza controlante

$\alpha$	$\beta$	$\tau_m$ de a	$\tau_m$ de e	$\tau_m$ de g
1	2	119.9421	3284.2675	24808.9366



**Figura 19:** Evaluación para la distribución a (línea azul), la e (línea roja) y la g (línea verde). Ceniza controlante. FBR y CSTR

**CONCLUSIONES**

En este trabajo, se propusieron nuevas correlaciones para estimar la conversión y el tiempo de residencia para sistemas donde el modelo de núcleo decreciente es aplicable con partículas uniformes. Se consideraron distintas resistencias controlantes para reactores con flujo pistón y para reactores perfectamente mezclados continuos. Las correlaciones propuestas son más exactas y simples que las aproximaciones tradicionalmente empleadas. Luego, se extendió la aplicación de las correlaciones propuestas al caso de partículas con tamaños no uniformes. Si bien esa aplicación requiere solución numérica, la demanda computacional es mucho menor que la requerida al emplear las aproximaciones tradicionales. Finalmente, se propuso un método simplificado para partículas no uniformes que no requiere solución numérica. Los resultados obtenidos con ese método son aceptables para un diseño rápido o en las primeras etapas de una optimización.

## REFERENCIAS

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>

Froment, G. F., De Wilde, J. y Bischoff, K. B. (2011). *Chemical reactor analysis and design* (3rd ed). Wiley.

Levenspiel, O. (2019). *Chemical reaction engineering* (3rd ed). Wiley.

Lu, H., Guo, X., Liu, Y. y Gong, X. (2015). Effect of Particle Size on Flow Mode and Flow Characteristics of Pulverized Coal. *KONA Powder and Particle Journal*, 32(0), 143-153. <https://doi.org/10.14356/kona.2015002>

Wen, C. Y. (1968). Noncatalytic heterogeneous solid-fluid reaction models. *Industrial & Engineering Chemistry*, 60(9), 34-54. <https://doi.org/10.1021/ie50705a007>

Yagi, S. y Kunii, D. (1955). Studies on combustion of carbon particles in flames and fluidized beds. *Symposium (International) on Combustion*, 5(1), 231-244. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(55\)80033-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(55)80033-1)

Yagi, S. y Kunii, D. (1961a). Fluidized-solids reactors with continuous solids feed—I: Residence time of particles in fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 16(3-4), 364-371. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(61\)80043-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(61)80043-2)

Yagi, S. y Kunii, D. (1961b). Fluidized-solids reactors with continuous solids feed—II. *Chemical Engineering Science*, 16(3-4), 372-379. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(61\)80044-4](https://doi.org/10.1016/0009-2509(61)80044-4)



Se terminó de imprimir en los Talleres Gráficos  
de la Editorial Científica Universitaria  
Secretaría de Investigación y Posgrado  
Universidad Nacional de Catamarca  
Agosto 2025