flacema
fundación laboral
andaluza del cemento
y el medio ambiente

Escuela Técnica Superior de
INGENIERÍA DE SEVILLA

OPTIMIZACIÓN DEL COSTE ELÉCTRICO CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL, COMO BASE PARA LA MEJORA DE LA COMPETITIVIDAD DE FÁBRICAS CEMENTERAS

D. Manuel Parejo Guzmán. Universidad de Sevilla.

Dra. Dª. Rafaela Alfalla-Luque. Universidad de Sevilla.

Dr. D. Benito Navarrete Rubia. Universidad de Sevilla.

Dr. D. Pedro Mora Peris. Universidad Politécnica de Madrid.

Sevilla, 27 de mayo de 2021

ÍNDICE

Resumen / Abstract.

Palabras Clave /Keywords.

1.- Introducción.

2.- Revisión de la Literatura y Panel de Expertos.

2.1. Revisión de la Literatura.

2.2. Panel de Expertos.

3.- Análisis de Algoritmos y Técnicas de Aprendizaje Automático.

4.- Desarrollo Metodológico.

4.1. Metodología para la Optimización Eléctrica Operacional. Eficiencia Eléctrica Operando Sobre Variables del Proceso Productivo.

4.2. Metodología para la Optimización Eléctrica Mediante Gestión de Costes Regulados.

4.3. Metodología para la Optimización Eléctrica en el Mercado. Economía Eléctrica.

5.- Análisis y Discusión de los Resultados Científicos y Líneas Futuras de la Investigación.

6.- Conclusiones.

ABSTRACT

This doctoral thesis aims at optimising electricity cost in a cement factory by means of using artificial intelligence. A systematic review of the literature, surveys and an expert panel were carried out with the collaboration of 42 professionals of the cement sector, which enabled us to develop a methodology focused on three aspects: 1) Optimise different variables of the production process. Artificial Neural Networks were used. 2) Shift electricity consumption to cheaper regulated electricity costs moments. Genetic Algorithms were used, and 3) Optimize market electricity purchase. Artificial Neural Networks were used.

This methodology can be applied to any cement plant in the world and, by including some adjustments, to any electro-intensive industry. We are in discussions with an expert-in-consulting company, specialized in engineering, to launch a pilot project to test the model.

PALABRAS CLAVE / KEYWORS:

Cemento - Inteligencia Artificial (IA)- Optimización del coste eléctrico - Redes Neuronales Artificiales – Algoritmos Genéticos.

Cement – Artificial Intelligence – electrical cost optimization - Artificial Neural Networks (ANNs) – Genetic Algorithms (GA).

Manuel Parejo Guzmán. Mayo 2021

1. INTRODUCCIÓN

CRISIS SECTOR CEMENTERO ESPAÑOL

- 2006: Consumo cemento: 55,9 millones t.
- 2014: Consumo cemento: 10,8 millones t.

- 80,67 %

- 2020: Consumo cemento: 13,3 millones t.

Exportación de cemento y clínker

- 2006: Exportación cemento: - 8,1 millones t.
- 2014: Exportación cemento: - 6,2 millones t.

- 23,1%

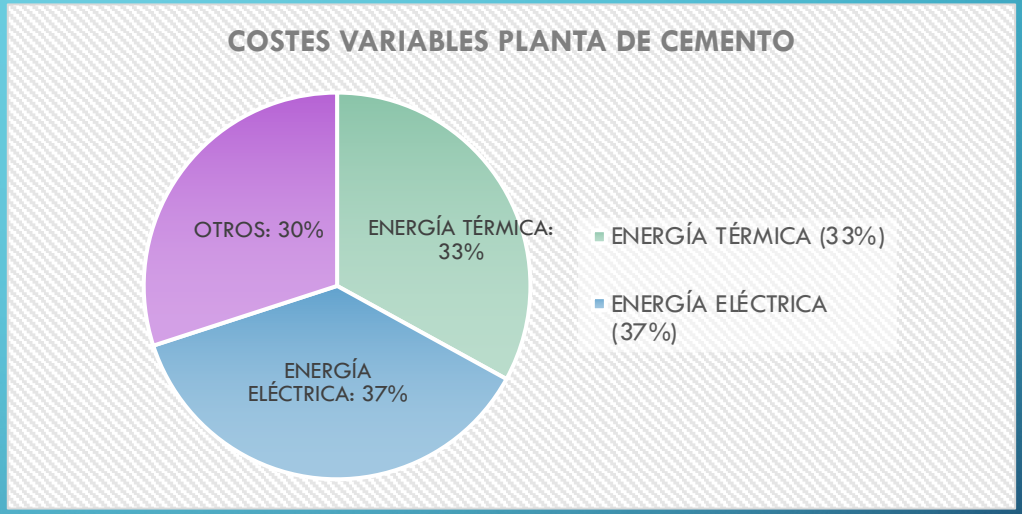
PÉRDIDA DE COMPETITIVIDAD

Uno de los factores que la provocan es el alto coste eléctrico

1. INTRODUCCIÓN

CONSUMO ENERGÉTICO PLANTA DE CEMENTO

"Una fábrica de 1.000.000 de t. tiene una factura eléctrica de entre 8 y 9 millones de €"



En 2018 la energía de la industria en España fue un 28,55 % más cara que la media de la UE-28

ESTUDIO (2019): Coste eléctrico de la Industria Electro intensiva UE-28, dentro de las bandas de consumo 20.000 MWh – 150.000 MWh

- Precio medio UE-28 (2019): 63,82 €
- Precio medio ESPAÑA (2019): **69,78 €**

18 países tenían un coste más barato de la electricidad

1. INTRODUCCIÓN

OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN ACADÉMICA

Mejorar la competitividad empresarial del sector cementero español, reduciendo el coste eléctrico que soporta través de un modelo basado en la Inteligencia Artificial (IA). Para ello se incidirá sobre 3 aspectos diferentes:

(1)
Determinadas variables que afectan al consumo de determinados equipos, que funcionan durante
5 fases críticas del proceso de producción de cemento.

(2)
Precios regulados:
(P_1, P_2, P_3, …, P_6).
Se intentará desplazar el consumo eléctrico de los períodos más caros (P1, P2), a los a los más económicos (P5, P6).

(3)
Compra de la electricidad en el mercado eléctrico.

Precio Spot
VS
Precio Cal

Optimización de precios.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y PANEL DE EXPERTOS

2.1. REVISIÓN DE LA LITERATURA:

3 BASES DE DATOS DE PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

1.- SCOPUS.
2.- WEB OF SCIENCE.
3.- ABI INFORMATION

PALABRAS CLAVE:
electricity, optimization, artificial intelligence y cement

477 **ARTÍCULOS CIENTÍFICOS**

REVISIÓN COMPLETA

14
ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y PANEL DE EXPERTOS

2.1. PANEL DE EXPERTOS:

Escasas aportaciones de la literatura previa para desarrollar una investigación…

CONSULTAS A EXPERTOS

42 EXPERTOS
(Interdisciplinares)

CARACTERÍSTICAS:

- 22 – 41 años de experiencia
- Formación: economistas; ingenieros civiles, industriales y de minas; químicos; etc.

APORTACIONES:

- 11 Expertos: Cuestionarios para información cuantitativa.
- 31 expertos: Encuestas para Información cualitativa. (5 Expertos en IA).

3. ANÁLISIS DE ALGORITMOS Y TÉCNICAS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

ÁRBOLES DE DECISIÓN

ALGORITMOS GENETICOS

REDES NEURONALES ARTIFICIALES (ANNs)

ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO Y ALGORITMOS

K-MEDIAS

MÁQUINAS VECTORES DE SOPORTE

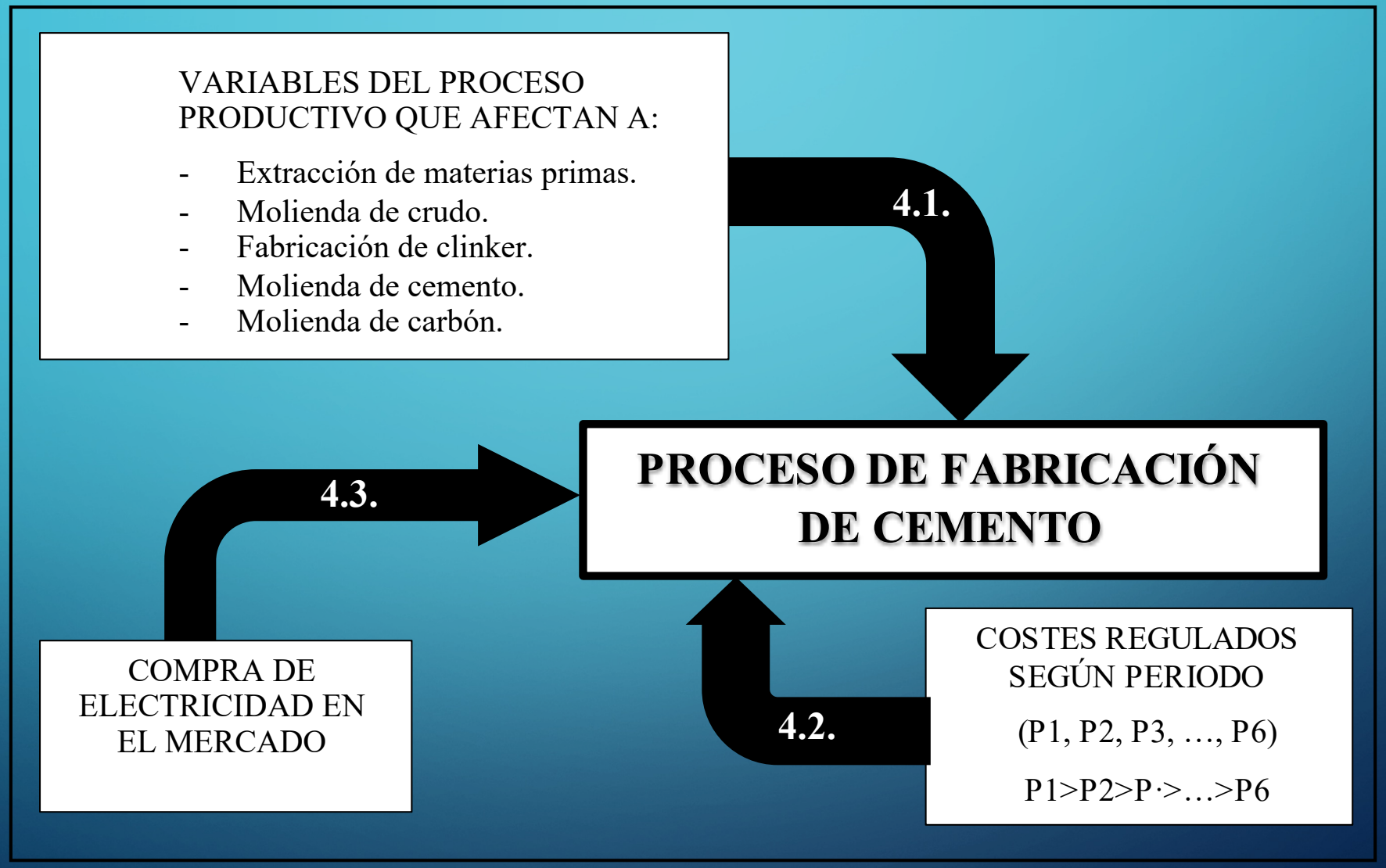
VECINOS MÁS CERCANOS

REDES BAYESINAS

LÓGICA DIFUSA

4. DESARROLLO METODOLÓGICO

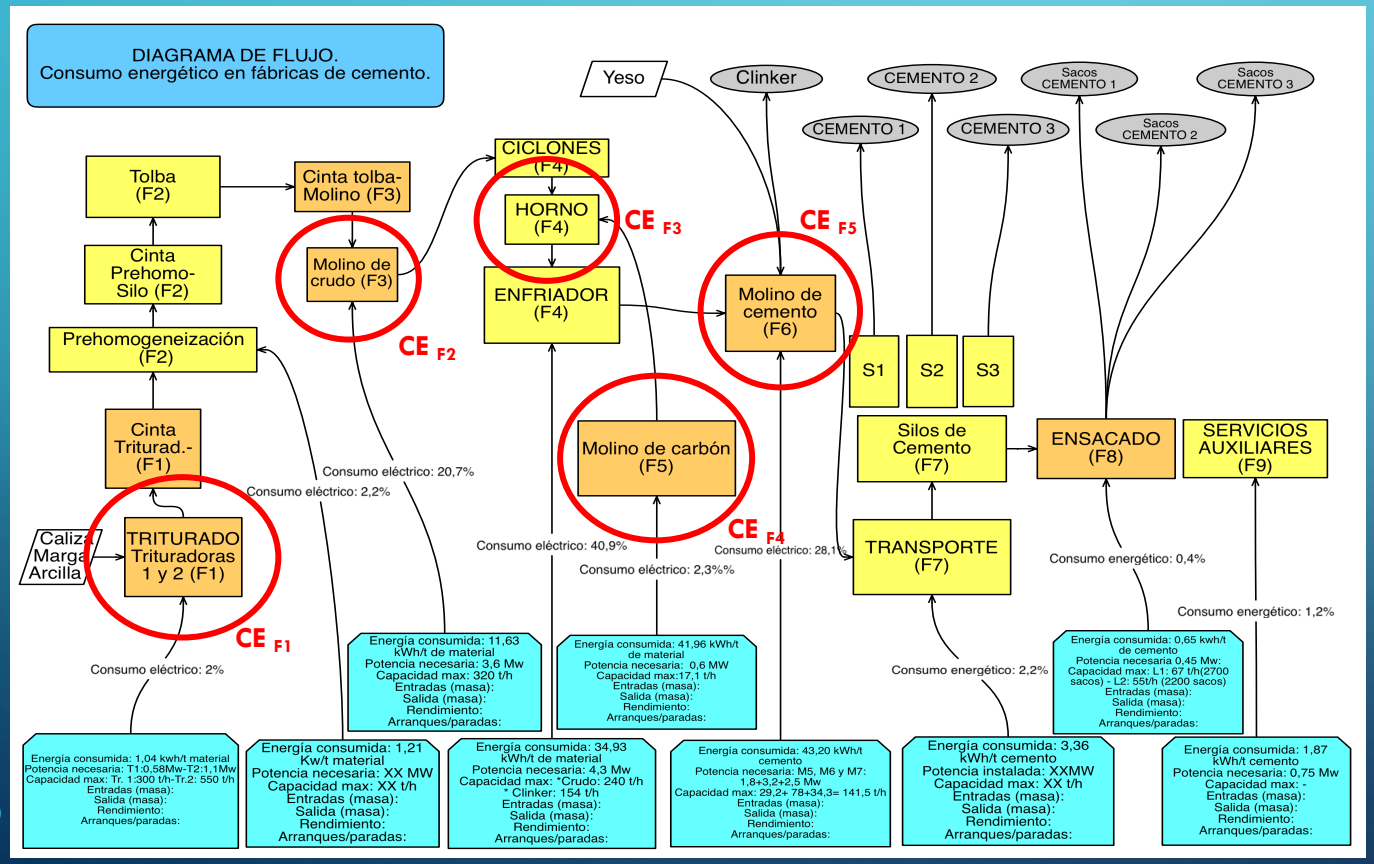
Figura 1. Metodologías para la optimización del coste eléctrico en cementeras.



4. DESARROLLO METODOLÓGICO.

4.1. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN ELÉCTRICA OPERACIONAL. EFICIENCIA ELÉCTRICA OPERANDO SOBRE VARIABLES DEL PROCESO PRODUCTIVO.

5 FASES CRÍTICAS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO



FUNCIONES DE CONSUMO ELÉCTRICO
(dependen de las 14 variables):

$CE_{F1} = F_1 (V_1, V_2)$
$CE_{F2} = F_2 (V_3, V_4, V_5, V_6)$
$CE_{F3} = F_3 (V_7, V_8)$
$CE_{F4} = F_4 (V_9\ V_{10})$
$CE_{F5} = F_4 (V_{911}\ V_{12}\ V_{13}, V_{14})$

$\sum CE_{Fn} = \sum F(V_i)$

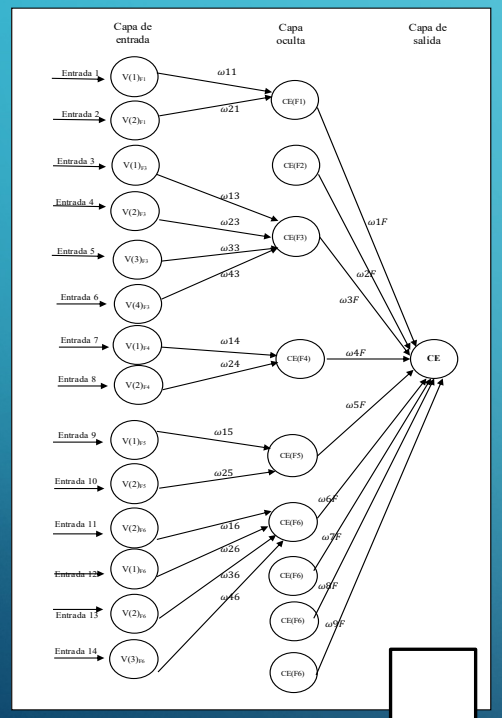
n: 1, …, 5 (Número de fases)
i:1, …, 14 (Número de variables)

Manuel Parejo Guzmán. Mayo 2021

4. DESARROLLO METODOLÓGICO.

4.1. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN ELÉCTRICA OPERACIONAL. EFICIENCIA ELÉCTRICA OPERANDO SOBRE VARIABLES DEL PROCESO PRODUCTIVO.

ARQUITECTURA DE RED NEURONAL (ANN)



FUNCIONAMIENTO DE DE LA ANN

Algoritmo Backpropagation

1.- Cada variable (V_iF_n) afecta al consumo eléctrico con un peso (ω).

2.- El Algoritmo Backpropagation, junto con el método de minimización del error *Mean Squared Error (MSE)*, aplicados a la ANN, nos ayudarán a determinar los valores correctos de los ω, minimizando el error entre el valor de salida (s) y el valor real observado (y) en la arquitectura de red neuronal.

3.- Una vez entrenada la ANN se introducirán distintas combinaciones de valores de las variables (V_iF_n) haciendo uso de los ω correctos.

OBJETIVO: Encontrar la combinación óptima de valores de las 14 variables que minimicen el consumo eléctrico.

4. DESARROLLO METODOLÓGICO.

4.2. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACION ELÉCTRICA MEDIANTE LA GESTIÓN DE LOS COSTES REGULADOS.

COSTE TOTAL ELÉCTRICO= Costes Regulados + Precio eléctrico

- Peajes por potencia (€/MWw).
- Peajes por energía (€/MWh).
- Impuesto Eléctrico (€/MWh).
- Pagos por capacidad (€/MWh).
- Pagos por Servicio general de Interrumpibilidad (€/MWh).
- Pago Fondo de Eficiencia Energética (€/MWh).

En España las tarifas eléctricas de alta tensión (con potencias contratadas superiores a 450 kW en alguno de los periodos), ofrecen 6 periodos horarios (P1, …, P6) con distintos costes regulados.

$Cte_{P1} > Cte_{P2} > \ldots > Cte_{p6}$

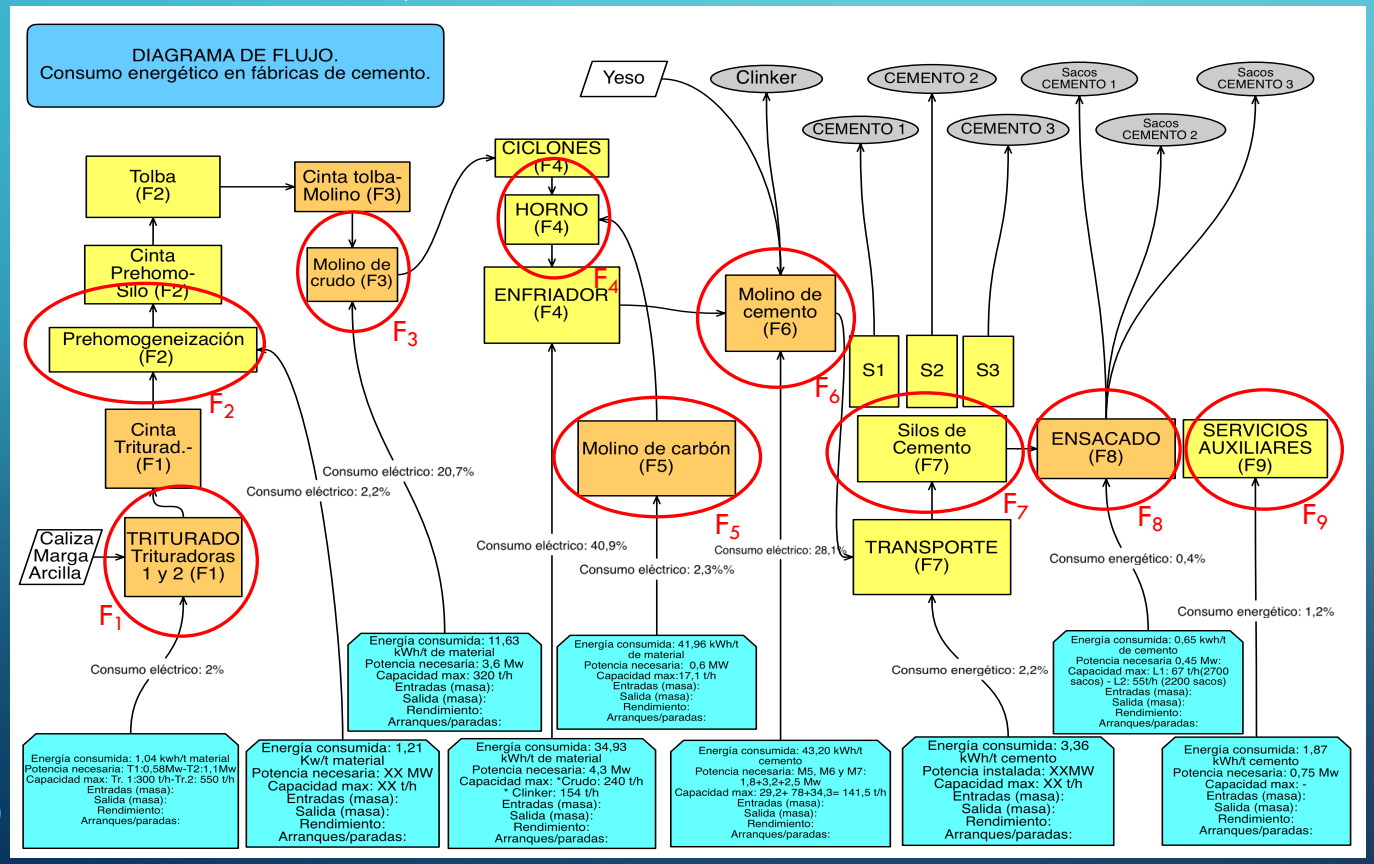
OBJETIVO:
Trasladar el consumo eléctrico a los períodos de menor coste (P_6, P_5, …).

4. DESARROLLO METODOLÓGICO.

4.2. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACION ELÉCTRICA MEDIANTE LA GESTIÓN DE LOS COSTES REGULADOS

PASO 1: Funciones de consumo eléctrico (9 Funciones)

Cada función de consumo de fase (CE_{FX}), será igual al sumatorio de los consumos eléctricos que tengan lugar en esa fase en cada uno de los 6 periodos P(Y).



$$\Sigma CE_{FX} = \Sigma PE_{FX}\ P(Y) * H_{FX}P(Y)$$

Siendo X=1, …,9 e Y=1, …, 6.

Manuel Parejo Guzmán. Mayo 2021

4. DESARROLLO METODOLÓGICO.

4.2. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACION ELÉCTRICA MEDIANTE LA GESTIÓN DE LOS COSTES REGULADOS

PASO 2: Funciones "Restricciones Tarifas de acceso" (6 Funciones)

→ Intentarán disminuir la potencia contratada si fuera posible

↓ Limitarán la posibilidad de sobrepasar las tarifas de acceso en cada uno de los 6 períodos

PASO 3: Funciones "Restricciones de Operación y Ventas" (10 Funciones)

→ La capacidad máxima de producción de cada fase del proceso de fabricación de cemento menos la capacidad máxima de la siguiente debe ser **> =0** y a su vez **<= que la capacidad de almacenamiento** de la materia prima, combustible, subproducto o producto final en cada fase del proceso, respectivamente (8 funciones).

↓ Limitaciones horarias (2 funciones). A causa del ruido que generan, las fases de trituración y ensacado estarán limitadas a ciertas horas del día.

4. DESARROLLO METODOLÓGICO.

4.2. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACION ELÉCTRICA MEDIANTE LA GESTIÓN DE LOS COSTES REGULADOS

Teniendo en cuenta:

- Las funciones de consumo eléctrico.
- La demanda de clinker y distintos tipos de cementos.
- Las restricciones de tarifas de acceso y
- Las restricciones de operación y ventas.

Los algoritmos genéticos aplicarán de manera continua, hasta alcanzar un valor óptimo, mecanismos de:

- Selección.
- Recombinación.
- Mutación de “cromosomas”, que en nuestro caso serán los distintos precios regulados.

Los algoritmos genéticos conseguirán que el sistema sugiera los cambios a realizar para desplazar la producción a periodos de menor coste (P6, P5, P4, etc.).

4. DESARROLLO METODOLÓGICO.

4.3. METODOLOGÍA METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACION ELÉCTRICA EN EL MERCADO. ECONOMÍA ELÉCTRICA

Es posible reducir los costes eléctricos de una fábrica de cemento optimizando la compra de la energía. Para ello se utilizarán técnicas de IA

Precio Futuro (Cal)
27/05/21

CONOCIDO

Precio Spot (Día "D-1")
26/05/22

¿ ?

Día para el uso de la Electricidad.
Día "D"
27/05/22

PREDECIR MEDIANTE EL USO DE ANN CON:

- Algoritmo Backpropagation.
- Método de minimización del error *Mean Squared Error (MSE)*.

4. DESARROLLO METODOLÓGICO.

4.3. METODOLOGÍA METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACION ELÉCTRICA EN EL MERCADO. ECONOMÍA ELÉCTRICA

Factores de Demanda

Factores de oferta

Estacionalidad

Laboralidad

FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA FORMACIÓN DEL PRECIO ELÉCTRICO

Climatología

Relación entre el precio diario máximo y mínimo

Tecnologías de generación:

- Energía nuclear.
- Energía eólica.
- Energía solar.
- Cogeneración.
- Hidráulica fluyente.
- Hidráulica con reservas anuales.
- Hidráulica por bombeo.
- Centrales Térmicas convencionales.
- Ciclo Combinado.
- Interconexiones Internacionales.
- Otras: biomasa, energía del mar, etc.

4. DESARROLLO METODOLÓGICO.

4.3. METODOLOGÍA METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACION ELÉCTRICA EN EL MERCADO. ECONOMÍA ELÉCTRICA

Precio Spot = F (Pr_{Max}/Pr_{Min}, Precio Cal X , mix energético, variables de entrada, laboralidad, estacionalidad) *ωis

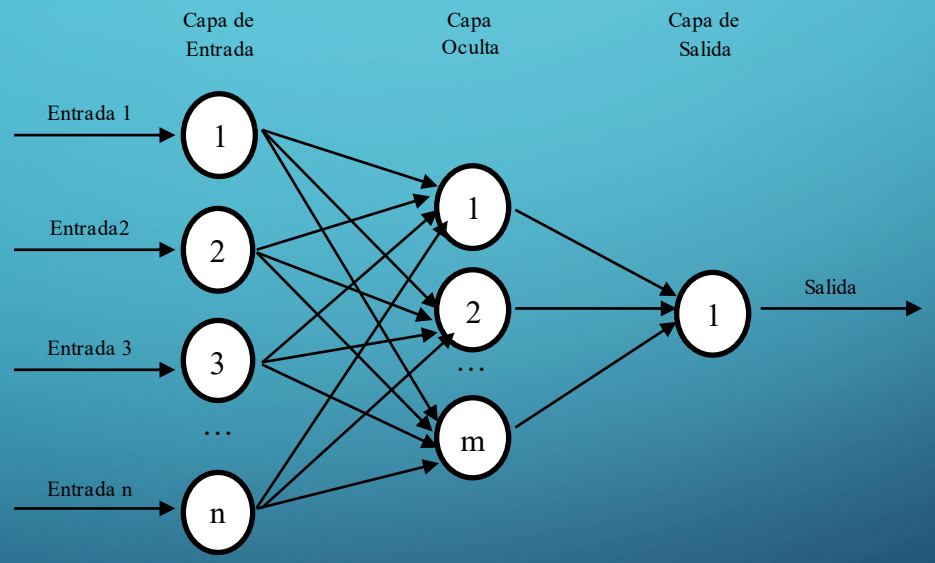


Figura 2. Representación básica de una Red Neuronal con 3 capas.
Fuente: Elaboración propia

4. DESARROLLO METODOLÓGICO.

4.3. METODOLOGÍA METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACION ELÉCTRICA EN EL MERCADO. ECONOMÍA ELÉCTRICA

Seguiremos los siguientes pasos:

1.-Entrenar a la red neuronal con el algoritmo de aprendizaje supervisado Backpropagation para determinar cómo afecta cada variable de entrada a la composición del mix eléctrico (ω).

2.-Una vez que el sistema conozca como afecta cada una de las variables determinadas en nuestro modelo al Precio Spot, mediante aprendizaje profundo -deep learning-, estaremos en disposición de realizar predicciones sobre el comportamiento de los precios, que nos permitirán decidir si deberíamos comprar la electricidad a precio spot o futuro (Cal).

Ejemplo: Si la red neuronal predijera que el precio spot del día "D-1" será mayor que el Precio cal que se da hoy, se adquiriría hoy la electricidad en el mercado de futuros al precio cal. Si predijera un menor precio, se compraría la electricidad en el mercado diario spot el día "D-1".

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

La revisión de literatura nos permite concluir que:

1) Los modelos de ANN multicapa de perceptrón y los algoritmos genéticos son herramientas útiles a la hora de predecir los precios futuros diarios de la electricidad.

2) La meteorología y el portfolio de generación eléctrica afectan al precio eléctrico.

3) Se puede reducir la factura eléctrica de distintas maneras, entre las que destacan:

+ Operando sobre ciertos factores que influyen en determinadas fases del proceso productivo y que presentan mayor consumo.
+ Trasladando el consumo eléctrico a los momentos diarios más económicos.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

Del panel de expertos, las conclusiones más importantes que se han podido extraer han sido:

1) Se ha llevado a cabo una comparativa del precio eléctrico de la industria electro intensiva española (20.000 MWh-150.000 MWh) con la europea, concluyendo que España presenta uno de los costes eléctricos más altos de la UE.

2) Los precios diarios de electricidad y los precios del mercado de futuros, la meteorología y el mix energético, son variables de entrada que resultan útiles para predecir los precios eléctricos. Para ello pueden emplearse modelos de ANN.

3) Se han determinado una serie de variables sobre las que se puede incidir de manera sencilla y sin incurrir en altos costes ni montantes de inversión, para conseguir reducciones en el consumo eléctrico.

4) Es posible reducir los costes eléctricos de una fábrica de cemento, optimizando la compra de la energía. Para ello se pueden utilizar ANN.

6. CONCLUSIONES

1.- Se ha desarrollado un modelo, basado en una ANN, para optimizar el coste eléctrico en las fábricas de cemento influyendo sobre determinadas variables del proceso e incurriendo en costes nulos o muy bajos.

2.- Podemos reducir el coste eléctrico optimizando los costes eléctricos regulados, es decir, trasladando el uso de los equipos de fábrica con mayor consumo eléctrico a periodos con costes eléctricos regulados más bajos. Mediante el uso de algoritmos genéticos de optimización, se intentará trasladar el consumo eléctrico a los P_i de menos coste.

3.- Es posible reducir el coste eléctrico en las fábricas de cemento optimizando la compra de electricidad en los mercados spot y a plazo, utilizando para ello herramientas de IA tales como las ANNs.

4.- El modelo que resulta de este proceso de investigación es aplicable a cualquier fábrica de cemento del mundo (de vía seca); modificando los parámetros iniciales, podía también aplicarse a otras industrias de transformación electro intensivas. Se trata por lo tanto de un modelo que cuenta con gran versatilidad.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

¡ MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN !