



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y
Telecomunicación

MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA DE DATOS E INGENIERÍA
DE COMPUTADORES

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Estudio sobre la Efectividad del Positional Encoding en Transformers para Series Temporales y Diseño de Mecanismos Adaptados

Presentado por:
Cristhian Moya Mota

Curso académico 2024-2025



Estudio sobre la Efectividad del Positional Encoding en Transformers para Series Temporales y Diseño de Mecanismos Adaptados

Cristhian Moya Mota

Cristhian Moya Mota *Estudio sobre la Efectividad del Positional Encoding en Transformers para Series Temporales y Diseño de Mecanismos Adaptados.*
Trabajo de fin de Grado. Curso académico 2024-2025.

**Responsable de
tutorización**

Julian Luengo Martín
DECSAI
Diego Jesús García Gil
LSI

Máster Universitario en
Ciencia de Datos e
Ingeniería de
Computadores
Escuela Técnica Superior
de Ingenierías Informática
y Telecomunicación
Universidad de Granada

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

D./Dña. Cristhian Moya Mota

Declaro explícitamente que el trabajo presentado como Trabajo de Fin de Grado (TFG), correspondiente al curso académico 2024-2025, es original, entendido esto en el sentido de que no he utilizado para la elaboración del trabajo fuentes sin citarlas debidamente.

En Granada a 2 de agosto de 2025

Fdo: Cristhian Moya Mota

Dedicatoria (opcional)

Agradecimientos

Agradecimientos (opcional, ver archivo preliminares/agradecimiento.tex).

Summary

An english summary of the project (around 800 and 1500 words are recommended).

File: preliminares/summary.tex

Índice general

Agradecimientos	V
Summary	VII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.1.1. Importancia de las Series Temporales	1
1.1.2. La dificultad de predicción a largo plazo: información posicional	3
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos	4
2. Tendencias y Estado del arte	7
2.1. Procesamiento básico de Series Temporales	7
2.1.1. Modelos basados en descomposición	8
2.1.2. Redes Neuronales Recurrentes	21
2.1.3. Transformers	27
2.2. Positional Encoding en Transformers	27
2.3. Conjuntos de datos disponibles	27
3. Selección y preprocesado de los conjuntos de datos	29
4. Modelos de encoding posicional y entorno de trabajo	31
5. Análisis comparativo de positional encoding sobre las bases de datos	33
6. Conclusiones y trabajos futuros	35
A. Ejemplo de apéndice	37
Glosario	39
Bibliografía	41

1. Introducción

En este primer punto, describiremos de forma breve la motivación a realizar este TFM. Analizaremos la importancia de poseer herramientas capaces de realizar una predicción a largo plazo en series temporales (en inglés, *Long-term Time Series Forecasting*, LSTF), pero, sobre todo, centrándonos en un aspecto clave: la codificación posicional (*Positional Encoding*, en adelante, PE), común a prácticamente todas las alternativas actuales del estado del arte.

Procederemos a justificar su importancia, así como a formular los objetivos que se cubren con la realización de este trabajo.

1.1. Motivación

En la actualidad, los datos son uno de los bienes más preciados. Las telecomunicaciones nos han permitido alcanzar un volumen inimaginable de información digital, la cual no somos prácticamente capaces de procesar, y extraer conocimiento útil se convierte en una tarea complicada. Su gran variedad y modalidad hace necesario disponer de modelos multimodales cada vez más complejos para procesarlos, como los modelos fundacionales [1], para tratar así de disponer de una herramienta cercana a ser capaz de procesar todo tipo de información.

Hemos podido apreciar grandes avances en el procesamiento de texto, con los grandes modelos de lenguaje como GPT, el cual se ha convertido en una herramienta que usamos habitualmente para resolver nuestras dudas. Ahora, incluso permite generar imágenes, video y audio, y pensar profundamente las respuestas.

Sin embargo, estos no son los únicos tipos de datos que podemos emplear para aprender. Los datos basados en flujos, y las series temporales, son un recurso clave que podemos emplear para resolver multitud de problemáticas. Podemos predecir a largo plazo, clasificar fenómenos, o bien, incluso detectar anomalías. En este trabajo, nos centraremos sobre todo en la primera tarea y las dificultades que existen en este ámbito.

1.1.1. Importancia de las Series Temporales

Las series temporales son un tipo de datos caracterizados por una secuencia organizada en el tiempo. Generalmente, consisten en una o varias variables observadas a intervalos regulares, con el objetivo de registrar la evolución de un fenómeno. Suelen recogerse de forma periódica mediante sensores o procesos automatizados (por ejemplo, la temperatura de un motor medida por un termostato electrónico), aunque también pueden originarse de forma irregular, como en el caso de registros manuales. Es importante que, cuando se trata de múltiples variables, estas se muestreen con la misma frecuencia para facilitar su análisis y evitar la necesidad de técnicas de imputación, que podrían introducir distorsiones en los resultados.

1. Introducción

El objetivo: utilizar estos datos para aprender qué ocurrirá en instantes futuros, realizando predicciones en un horizonte concreto sobre el que es desconocido su comportamiento. Sin embargo, es importante destacar que no todos los fenómenos pueden ser predichos aunque dispongamos de un conjunto de datos suficiente y adecuado. Es esencial que, para que la técnica sea efectiva, estemos ante una tarea de forecasting, es decir, de predicción de elementos futuros, pero pudiéndonos apoyar en información pasada para comprender el fenómeno que estamos estudiando. Por ejemplo, tratar de predecir la temperatura que hará en las próximas 2 horas, en intervalos de 15 minutos, es una tarea viable: disponemos de gran cantidad de recursos históricos, como la tendencia de las horas anteriores, y los valores históricos de días previos, o incluso, el comportamiento en años anteriores, que pueden ser útiles.

Pero también podríamos enfrentarnos a escenarios más complejos, como el que gestiona diariamente Red Eléctrica para estimar el consumo de electricidad y responder con los tipos de energía más adecuados, evitando tanto el exceso como el déficit en la red. Para ello, se apoyan no solo en datos históricos de consumo, sino también en la información en tiempo real proveniente de sensores y mediciones realizadas en distintas estaciones eléctricas, lo que permite anticipar fluctuaciones y minimizar problemas de sincronización. A esto se suman otros factores externos que pueden influir, como las condiciones meteorológicas o incidencias en redes interconectadas de países vecinos. Tras la experiencia vivida en abril de 2025, queda en evidencia la importancia de esta tarea, ya que en caso de error, las consecuencias pueden ser muy graves: personas atrapadas en ascensores, hospitales en emergencia, problemas de tráfico, interrupción de la cadena de frío en los alimentos... Las pérdidas económicas se estimaron entre 1.600 y 2.500 millones de euros.

Por tanto, disponer de buenas técnicas de estudio para series temporales es una herramienta clave en multitud de aplicaciones. Manualmente, podemos realizar aproximaciones posibles para casos sencillos, donde apreciamos un comportamiento repetitivo en el tiempo de la serie (estacionalidad) o un comportamiento estrictamente creciente o decreciente linealmente (tendencia). Sin embargo, cuando el problema se vuelve más complejo o involucra múltiples variables, recurrir a matemáticas simples o técnicas intuitivas ya no es suficiente. En estos casos, es necesario contar con herramientas más sofisticadas que permitan modelar el comportamiento de la serie de forma aproximada, pero lo más fiel posible a la realidad.

Es aquí donde entran en juego métodos ampliamente utilizados, como la descomposición de la serie en componentes fundamentales: tendencia, estacionalidad y ruido. Una de las técnicas estadísticas más reconocidas en este ámbito es ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) [2]. Se basa en utilizar una ventana deslizante sobre la que ir calculando una media móvil, es decir, un intervalo de amplitud q en torno a un valor central, el cual se va moviendo de izquierda a derecha para evaluar con todas las instancias de la serie, y en una componente autoregresiva, que trata de incorporar información de instantes anteriores al que se está evaluando (hasta p valores). También se integra la serie tantas veces como sea necesario para suavizar su comportamiento. De este modo, es posible generar predicciones razonables, siempre y cuando el problema cumpla con ciertas condiciones que abordaremos más adelante.

No obstante, incluso técnicas como ARIMA presentan limitaciones importantes, especialmente cuando se enfrentan a horizontes de predicción amplios. A medida que intentamos anticipar valores más alejados en el tiempo, el modelo se ve obligado a basarse cada vez más

en sus propias predicciones previas en lugar de los datos observados, lo que provoca una acumulación progresiva de errores.

Esto plantea la necesidad de modelos más robustos, capaces de capturar dependencias de largo alcance y manejar múltiples variables de forma conjunta, tratando de minimizar el error evitando su acumulación. Podemos recurrir, como alternativa, a una de las herramientas ya empleadas en los grandes modelos de lenguaje que mencionamos anteriormente: los Transformers [15]. Pero su uso no es directo; debemos de adaptar su funcionamiento a las series temporales, ya que estos modelos, originalmente diseñados para tareas de lenguaje natural, no conservan de manera adecuada la información temporal del orden de los datos.

1.1.2. La dificultad de predicción a largo plazo: información posicional

Para poder adaptar modelos basados en Transformers para lenguaje natural a series temporales, es imprescindible introducir mecanismos de codificación posicional (positional encoding) que permitan al modelo interpretar correctamente la secuencia en el tiempo [9]. Sin este componente, los Transformers serían incapaces de distinguir el orden de la entrada, lo cual es esencial para predecir correctamente la evolución de un fenómeno.

Encontrar una codificación eficiente, sencilla y coherente con la estructura de los datos se encuentra en continua búsqueda en el estado del arte, pero la mayoría de ellas presentan los siguientes inconvenientes:

- **Falta de captura de la estructura.** En muchas ocasiones, se opta por utilizar codificaciones sencillas basadas en senos y cosenos, de la misma forma que se hace en procesamiento de lenguaje, pero de esta forma, estamos perdiendo información de patrones estacionales e información local de interés. Esto ocurre, por ejemplo, en modelos como Informer [16], uno de los primeros en adaptar los Transformers a series temporales.
- **Dificultad para adaptarse a diferentes escalas temporales y falta de semántica.** Propuestas simples, como la ya mencionada codificación sinusoidal, pueden ser ineficientes cuando se busca trabajar con distintas granularidades temporales. Al tratarse de una codificación fija, sus valores no se ajustan al cambiar la frecuencia de muestreo (por ejemplo, de segundos a minutos), ya que mantienen una amplitud y periodicidad predefinidas. Por otro lado, aproximaciones más complejas, como las basadas en convoluciones, intentan capturar patrones locales dentro de la secuencia, pero tienden a centrarse en un corto plazo, lo que dificulta la detección de relaciones de largo alcance o multiescala. Además, este tipo de codificación no incorpora explícitamente la semántica temporal (como la hora del día o el día de la semana), lo que limita su interpretabilidad y generalización en tareas donde esa información es relevante.
- **Complejidad.** Para paliar las dificultades de los métodos más simples, se han evaluado alternativas más complejas, que permiten aumentar el rendimiento: es el caso de Autoformer, que incorpora información autoregresiva al modelo, tomando así cierta similitud con la componente AR de ARIMA; o bien, se proponen encodings basados en transformadas de Fourier. Pero estas aumentan la necesidad de cómputo y el tiempo necesario para su entrenamiento, lo cual hace surgir otra vertiente alternativa, basada en modelos más sencillos, como Reformer [11], que trata de convertir la

1. Introducción

eficiencia cuadrática de los Transformers, a lineal. O Informer, que persigue lograr eficiencia $n \log n$ mediante su ProbSparse Attention [16]. Pero, a veces puede conseguirse el efecto contrario: empeorar en exceso los resultados, a consta de un menor tiempo de entrenamiento e inferencia. Por ejemplo, en Informer, al muestrearse en atención solo ciertos vectores de entrada, perdemos información local que puede ser clave.

La misión de este trabajo se centra en tratar de encontrar una alternativa que sea capaz de mantenerse cercana a la semántica del problema, permitiendo adaptabilidad en cuanto a parámetros, y tratando de alcanzar un equilibrio entre eficiencia y rendimiento.

1.2. Justificación

Tras estudiar el problema, surge la necesidad de crear una alternativa adecuada a los modelos de codificación existentes, incorporando dentro de ella la semántica del propio problema, e información local que permita una mayor adaptabilidad de los modelos creados, reduciendo las tasas de error. Aunque este objetivo ya es tratado por diversos modelos y líneas de investigación del estado del arte, en este trabajo buscamos replantear el positional encoding para que sea adaptable y capaz de incorporar información global y local, dando mayor importancia a una u otra en función de la entrada dada.

Todo esto se plantea aprovechando el conocimiento adquirido a partir de técnicas más clásicas, como ARIMA, e incorporando información estadística que resulte comprensible para prácticamente cualquier persona que utilice el modelo. De este modo, aunque se recurra posteriormente a modelos profundos como los Transformers, la codificación posicional introducida al inicio en los datos puede ser ajustable y fácilmente interpretable en función del contexto del problema.

Hasta ahora, gran parte de los esfuerzos se han centrado en adaptar soluciones desarrolladas originalmente para otros dominios, principalmente el procesamiento de lenguaje natural, al contexto de las series temporales. Sin embargo, estas adaptaciones no siempre se alinean completamente con las particularidades de los datos temporales, lo que puede derivar en pérdidas de información relevantes o en un rendimiento subóptimo. Esta desconexión pone de relieve la necesidad de desarrollar codificaciones específicamente diseñadas para capturar la estructura temporal propia de este tipo de datos. En este documento, abordaremos esta problemática desde una perspectiva crítica, comparando distintos métodos existentes y proponiendo nuevas soluciones, algunas de ellas híbridas, que buscan mejorar la representación temporal en modelos basados en Transformers.

1.3. Objetivos

Teniendo en cuenta los conceptos descritos anteriormente, y analizando el estado del arte en la actualidad, vemos justificada la necesidad de encontrar nuevas codificaciones posicionales con el objetivo de conseguir:

1. Realizar una revisión exhaustiva del estado del arte sobre positional encoding y su aplicación en modelos Transformer para series temporales, estudiando el funciona-

miento de las diferentes técnicas y extrayendo el conocimiento útil para crear nuevas alternativas.

2. Analizar las propuestas originales de positional encoding adaptadas a series temporales, realizando un análisis crítico y explorando las diferentes vías alternativas.
3. Evaluar sistemáticamente la efectividad de los positional encoding estándar en tareas de forecasting sobre benchmarks de series temporales, haciendo uso de varios conjuntos de datos de diferente procedencia y estructura.
4. Establecer criterios claros para el diseño de nuevas codificaciones que permitan encontrar nuevas formas de incorporar información útil, pero además sirvan como guía para investigaciones futuras, identificando buenas prácticas, limitaciones comunes y condiciones bajo las cuales cada enfoque resulta más adecuado.
5. Comparar el impacto de las distintas codificaciones posicionales no solo en la precisión de las predicciones, sino también en aspectos como la capacidad de generalización y su eficiencia computacional.

En este documento, se recoge el estudio del estado del arte actual, realizando un estudio crítico y comparativo de las diferentes propuestas, haciendo también hincapié en el propio funcionamiento de los Transformer y como afecta a la codificación y procesado de la información. Se buscará, como ya se ha mencionado, crear un resumen con diferentes técnicas, nuevas y otras conocidas, que por separado o en su conjunto, de forma híbrida, propongan soluciones adecuadas a diferentes conjuntos de datos provenientes del mundo real.

Adicionalmente, se proporciona un repositorio en GitHub¹ que contiene todo el código desarrollado, así como las referencias a los conjuntos de datos utilizados. Este recurso se mantiene accesible con el objetivo de facilitar su análisis, reutilización y posible mejora en trabajos futuros.

¹<https://github.com/hexecoded/TFM>

2. Tendencias y Estado del arte

Antes de adentrarnos de lleno en el análisis del problema y la realización de nuevas metodologías, es necesario estudiar y comprender el estado actual de esta temática en el estado del arte. Debido a que no se ha visto tan explotada como otros ámbitos de la IA, como es el caso de los modelos convolucionales o el aprendizaje automático supervisado tabular, podemos encontrar continuos cambios y nuevas vertientes que pueden inspirarnos a la hora de abordar el problema.

Hasta hace una década, buena parte de las técnicas diseñadas especialmente para series temporales y predicción a largo plazo, se basan principalmente en la descomposición las mismas en subcomponentes mucho más sencillas de procesar, las cuales pueden seguir un enfoque similar a divide y vencerás: descomponer la red en diferentes elementos, y mediante un mecanismo de agregación (aditivo, multiplicativo, o estadístico), recomponer la solución a la tarea. Sin embargo, se trata de una estrategia últimamente menos utilizada, en decadencia a favor de nuevas técnicas

Actualmente, una de las principales tendencias consiste en adaptar modelos originalmente desarrollados para otras modalidades. Un ejemplo de ello es el uso de convoluciones, ampliamente utilizadas en visión por computador, con el objetivo de capturar patrones locales en las secuencias y reducir la dimensionalidad del modelo. Previamente, también se han explorado arquitecturas recurrentes, como las Recurrent Neural Networks (RNN) y sus variantes más avanzadas, como las Long Short-Term Memory (LSTM) [6], aunque estas presentaban ciertas limitaciones en cuanto a capacidad de paralelización y en la modelización de relaciones temporales de mayor alcance, ya que para lograrlo aumentaba en exceso el tamaño de la red para incorporar más conexiones.

Más recientemente, ha ganado protagonismo la adaptación de mecanismos provenientes del procesamiento de lenguaje natural, en particular los Transformers, debido a su capacidad para modelar dependencias a largo plazo de forma eficiente. Además, comparten una motivación estructural con las series temporales: la necesidad de preservar una secuencia ordenada y coherente en la entrada, lo que permite aprovechar su arquitectura basada en atención para tareas de predicción.

A continuación, nos adentraremos de lleno en dichas propuestas, con el fin de aclarar, en primer, los conceptos clave acerca de las series temporales, y además, entender las problemáticas que surgen durante su procesamiento.

2.1. Procesamiento básico de Series Temporales

En la introducción, se han presentado brevemente las características fundamentales de las series temporales: su estructura temporal, caracterizada por muestreo, la importancia del orden de medición, y la necesidad de mantener las relaciones temporales para lograr aprender

de forma efectiva.

Pero, en esta sección, profundizaremos en los aspectos clave del preprocesamiento necesario para su análisis de manera más formal, ya que a diferencia de otros tipos de datos, las series temporales requieren una atención especial a la dimensión temporal, y cualquier alteración en su estructura puede afectar directamente la capacidad del modelo para aprender los patrones subyacentes en ella. Por ello, es fundamental centrarnos en cuestiones como la frecuencia de muestreo, la consistencia temporal, el tratamiento de valores faltantes, y la normalización de las variables.

2.1.1. Modelos basados en descomposición

Las series temporales pueden exhibir una gran cantidad de patrones y comportamientos, los cuales son interesantes de estudiar y visualizar con claridad para estudiar que posible enfoque seguir a la hora de resolver el problema. Diferenciando cada una de las partes, podemos tratar de resolver cada una de ellas por separado, y posteriormente, construir un modelo agregado capaz de solucionar nuestro problema.

Frecuentemente, podemos encontrar 3 comportamientos, los cuales son fácilmente identificables incluso gráficamente, que nos permiten obtener información bastante valiosa acerca del problema que estamos estudiando, y nos facilitan la decisión de escoger la técnica adecuada:

- **Tendencia.** Es el movimiento de los valores de serie a largo plazo, es decir, el comportamiento mostrado por los datos a la hora de estudiar su progresión desde el inicio de la serie hasta su final. El objetivo es encontrar si esta mantiene una dirección, de manera general, en su periodo de muestreo, buscando si sigue un comportamiento creciente, decreciente o constante, al igual que en el caso de estudio de monotonía clásico en funciones. Normalmente, se representan mediante comportamientos sencillos, y no se ven afectadas por grandes variaciones o el impacto de otras componentes de la serie, como variables aleatorias u otros factores externos. Normalmente, podemos modelarla haciendo uso de funciones elementales, como ecuaciones lineales o funciones exponenciales, logarítmicas o polinomiales.

A veces, se requieren procesos de suavizado para así poder eliminar el efecto de otras componentes ruidosas que rodean la tendencia real de la serie. Esto se puede conseguir, de manera similar a la convolución, desplazando una ventana a lo largo de la serie, de manera que los valores dentro de ella sean suavizado. La forma más habitual de lograrlo es con una media móvil, la cual, cuanto mayor amplitud tenga, mayor reducción de ruido conseguiremos.

En la figura 2.1, podemos ver un ejemplo de su cálculo representado gráficamente sobre el dataset Air Passengers [4].

- **Estacionalidad.** Son fluctuaciones periódicas y predecibles dentro de la serie temporal, las cuales siguen una determinada frecuencia y que pueden ser fácilmente modelables una vez se observa al menos un periodo. Normalmente, coinciden con unidades de medida de calendario, pudiendo encontrar así frecuencias semanales, mensuales, trimestrales, anuales... etc. Normalmente, son un factor visualmente sencillo de identi-



Figura 2.1.: Estudio de la tendencia en el dataset Air Passengers

ficar, el cual apenas varía entre períodos, y que nos permite obtener información muy valiosa para el modelado.

Podemos encontrar este comportamiento, por ejemplo, en los desplazamientos realizados durante las épocas vacacionales: podremos observar un patrón de crecimiento en estas en Navidad y las vacaciones de verano, principalmente julio y agosto; y en el resto de meses el comportamiento será a la baja. Y eso ocurrirá con un período anual, ya que dichas fechas se ubican siempre en el mismo lugar. Diferente caso sería con Semana Santa, ya que su fecha no es coincidente todos los años y no cumple al 100 % de estacionalidad como las otras dos, ya que aunque es acotable en calendario, no es exactamente coincidente anualmente.

En el caso del dataset anterior, se puede observar esta estacionalidad claramente (figura 2.2)

- **Ciclo.** Son también fluctuaciones de la serie temporal, pero, a diferencia de ser regulares, siguen un período irregular de longitud fija. Normalmente, está vinculado a eventos que no están especialmente vinculados a fenómenos de calendario. El ejemplo más representativo podría ser la tendencia de crecimiento económico de un país, o el comportamiento de las acciones en bolsa de una sociedad anónima.

En la figura 2.3 podemos un ejemplo de este comportamiento con los permisos concedidos para la construcción de viviendas en EEUU [10], donde no podemos encontrar patrones claros como en Air Passengers.

2. Tendencias y Estado del arte



Figura 2.2.: Estudio de la estacionalidad en el dataset Air Passengers



Figura 2.3.: Estudio de ciclos en USA building permits

Una vez comprendidos estos conceptos, podremos utilizar su información para decidir qué modelo se adapta mejor a nuestro problema y además tratar de modelar la tendencia y la estacionalidad. Anteriormente, mencionamos la gran utilidad de modelos como ARI-MA, que funciona bajo este concepto. Pero no se trata del único modelo existente bajo este paradigma, sino uno de los más utilizados. En función del mecanismo de agregación de la solución, podemos clasificar las técnicas en dos grupos:

- **Descomposición aditiva.** Realiza una separación de la serie temporal en varias componentes, las cuales son modeladas por separado y sumadas entre sí para dar lugar a

la función predicha final (ecuación 2.1.1). Es la más sencilla de usar en casos simples. Es indicada cuando las fluctuaciones estacionales por las variaciones entorno a la tendencia no varían con el valor de la serie temporal, es decir, pueden prácticamente mantenerse entre a lo largo de toda la serie sin apenas cambios. En general, se usa cuando los elementos no depende los unos de otros.

$$y(t) = T(t) + S(t) + C(t) + E(t)$$

- **Descomposición multiplicativa.** Se utiliza esta alternativa cuando las diferentes componentes dependen en nivel general de la serie (ecuación 2.1.1). Es el caso de las series en las cuales los aumentos en la tendencia provocan aumentos también los picos de las tendencias estacionales o los ciclos. Por ejemplo, en el dataset de Air Passengers, el comportamiento que se da es de este tipo.

$$y(t) = T(t) \times S(t) \times C(t) \times E(t)$$

Donde, en ambos casos:

- $T(t)$: Componente de la tendencia
- $S(t)$: Componente estacional
- $C(t)$: Componente cíclica
- $E(t)$: Componente aleatoria y error

La elección de cada método depende, por tanto, de los datos, y nos beneficiaremos, como ya hemos visto a lo largo de la definición, de una adecuada visualización de los mismos cuando sea posible.

A continuación, definiremos en mayor detalle 3 de los algoritmos basados en descomposición más usados: STL [5], ARIMA [3] y Prophet [14].

2.1.1.1. STL

Esta técnica, llamada *Seasonal Time-Series Decomposition*, nos permite descomponer la serie en partes más sencillas de modelar, separando la serie en tres componentes básicas: tendencia, estacionalidad y resto, siguiendo así el esquema visto anteriormente. De esta forma, podemos comprender en mayor detalle cómo evolucionan los valores a lo largo del tiempo, y comprender mejor cómo modelar su comportamiento.

Funcionamiento

Para obtener un modelo para cada una de ellas, normalmente se sigue un proceso de 3 pasos que nos permite aislar la información.

1. **Extracción de la tendencia.** Se comienza extrayendo la tendencia de la serie para así obtener el comportamiento subyacente de la misma, y saber si es creciente, decreciente o se mantiene constante. En este algoritmo, se consigue mediante un proceso de suavizado, llamado *Locally Estimated Scatterplot Smoothing* (Loess) de manera iterativa. Para ello, primero se comienza aplicando Loess, de manera que se suavizan los valores realizando una regresión no paramétrica, donde se observan los valores cercanos a

2. Tendencias y Estado del arte

cada timestamp de manera que se realiza un promedio que reduce las diferencias en el entorno. Si la serie es muy compleja o ruidosa, es posible que sea necesario repetir este proceso varias veces, por lo que se convierte en un proceso iterativo, utilizando tamaños mayores de ventana entorno a cada valor.

Dicha ventana se estima a través de pesos, los cuales se ven reducidos cuanto más alejados al valor están. Estos se rigen por el valor de amplitud h , que recogen las ecuaciones clásicas de la regresión de Loess. Dado un conjunto de datos (t_i, y_i) , el valor suavizado en t_0 se calcula como:

$$\hat{y}(t_0) = \mathbf{x}_0^\top \hat{\boldsymbol{\beta}}(t_0)$$

donde $\hat{\boldsymbol{\beta}}(t_0)$ se obtiene minimizando la suma ponderada de errores:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}(t_0) = \arg \min_{\boldsymbol{\beta}} \sum_{i=1}^n w_i(t_0) (y_i - \mathbf{x}_i^\top \boldsymbol{\beta})^2$$

Los pesos $w_i(t_0)$ dependen de la distancia temporal y se definen, habitualmente, con el kernel tricúbico:

$$w_i(t_0) = \left(1 - \left|\frac{t_i - t_0}{h}\right|^3\right)^3, \quad \text{para } |t_i - t_0| < h$$

El valor arrojado será o fuera del intervalo, y un valor entre 0 y 1 dentro de él, seleccionando así la relevancia de cada punto respecto a sus valores del entorno.

2. **Extracción de la estacionalidad.** Para extraer la estacionalidad, debemos aislarla de la tendencia que modelamos en el paso anterior. Para ello, basta con restar dicha componente a la serie original, y así disponer ahora únicamente de los patrones estacionales y el ruido.

$$y'(t) = y(t) - \text{trend}(t)$$

A partir de aquí, debemos dividir la serie sin tendencia en subseries estacionales, agrupando los datos según la posición que ocupan dentro del ciclo; por ejemplo, si identificamos patrones con frecuencia mensual, se agruparían todos los valores correspondientes al mismo mes en años distintos, y sobre cada una de estas subseries se aplica un suavizado Loess de forma individual. Así, podremos capturar con precisión el patrón que se repite en cada estación, de manera similar a un promedio. Gracias a este proceso, podremos reconstruir una componente estacional coherente con las variaciones periódicas observadas en nuestro conjunto de datos, al que denominaremos $s(t)$.

3. **Obtención del resto.** Una vez extraídas tanto la tendencia como la estacionalidad, la componente residual se obtiene simplemente como la diferencia entre la serie original y la suma de las dos componentes anteriores:

$$r(t) = y(t) - \text{trend}(t) - s(t)$$

Esta parte representa la variabilidad no explicada por los patrones sistemáticos de largo plazo ni por los ciclos periódicos, e incluye tanto el ruido aleatorio como cualquier

información no capturada por el modelo. Si bien no es modelable, es muy útil para identificar si la serie es correctamente modelable por este método, ya que si observamos demasiada información en esta componente, nos está indicando que una parte importante de la información no está siendo recogida. Lo deseable es la que la varianza descrita sea la mínima posible. Sin embargo, hay algunos casos en los que encontrar puntos extremos es de utilidad, y se trata de la búsqueda de valores anómalos. Si la serie restante permanece estable y con poca varianza, a excepción de ciertos puntos, puede ser de interés estudiar qué ocurrió en dichos instantes, ya que su comportamiento se sale del comportamiento habitual modelado.

En su publicación original, podemos encontrar un ejemplo de ejecución sobre el conjunto de datos *Daily Carbon Dioxide Data* (ver figura 2.4), que recoge información sobre las emisiones de CO_2 desde el 17 de abril de 1974 hasta el 31 de diciembre de 1986, y permite observar la información recogida por cada una de las componentes.

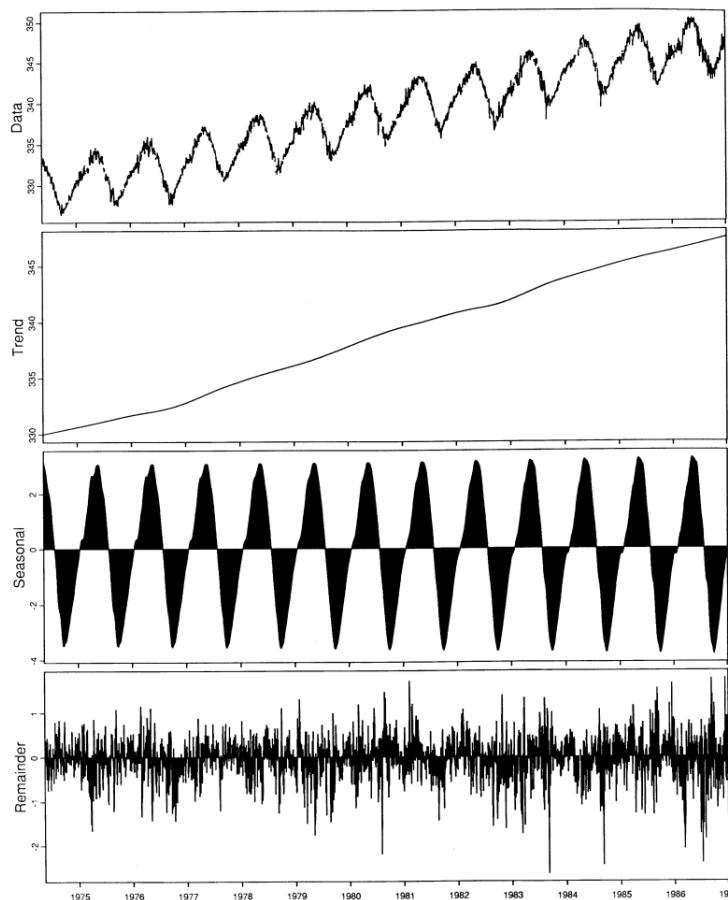


Figura 2.4.: STL: Ejemplo de caso de estudio, Daily Carbon Dioxide Data [5]

En este caso, podemos apreciar visualmente una serie fácilmente modelable por este enfoque, ya que la curva describe una tendencia creciente bastante clara, y los periodos estacionales están bastante bien delimitados y no se ven influenciados por el crecimiento recogido en

2. Tendencias y Estado del arte

la tendencia. Es un ejemplo perfecto para el uso de los modelos basados en descomposición aditiva.

Conclusiones

STL supuso una buena base para modelos posteriores, pero esta forma de modelado presenta varias limitaciones, que acotan su funcionamiento a problemas simples:

- Sólo se limita a descomponer series de naturaleza aditiva, por lo que aquellas en las que las diferentes componentes se vean influenciados entre sí requerirán técnicas propias de modelos multiplicativos.
- Pueden perderse gran cantidad de detalles explicados por los datos, debido a la configuración del parámetro de suavizado. Si alisamos de más la serie, podemos estar perdiendo información clave acerca de nuestro problema, dejando completamente de lado ciertos comportamientos sutiles, lo cual aumenta la tasa de error. Debemos escoger adecuadamente los valores al aplicar Loess.
- Es costoso computacionalmente en caso de series de larga duración, ya que el cálculo de aplicar el kernel se hace para cada punto en cada iteración sobre el conjunto de datos, tanto para encontrar la tendencia como para luego generalizar la estacionalidad.

Pero, sin lugar a dudas, la principal desventaja de este método es que no consigue por sí solo lo que deseamos resolver en este trabajo: predecir, sobre todo, a largo plazo. STL es un procedimiento muy útil que nos permite entender el comportamiento de los datos, y descomponerlo para comprender el funcionamiento de cada componente, pero no es posible por sí solo realizar predicciones. Dependemos del apoyo de otros procedimientos que nos permitan estimar, basándonos en este historial, la progresión de las componentes extraídas como la tendencia (modelable por regresión), y la estacional, la cual podría ser evaluada de manera simplificada por su valor medio histórico por intervalo.

Esto lo hace en un método interesante desde el punto de vista de análisis, y que permite dar lugar a modelos que sí son capaces de estimar predicciones futuras, pero no es una herramienta por sí sola que nos permita resolver la tarea que nos concierne en este trabajo.

2.1.1.2. ARIMA

Basándonos de nuevo en el método de descomposición de series, podemos encontrar el modelo **ARIMA** (*AutoRegressive Integrated Moving Average*) una técnica estadística ampliamente utilizada para el modelado de series temporales univariantes. Como ya adelantamos en la introducción del proyecto, su estructura se basa en la combinación de tres componentes principales: una parte autoregresiva (AR), una parte integrada (I) y una parte de media móvil (MA). Cada una de estas partes permite capturar diferentes aspectos del comportamiento temporal de los datos.

Componente de Integración

Por integración, entendemos el número de veces que es necesario integrar la serie temporal original para que esta se vuelva estacionaria. De manera resumida, una serie estacionaria es aquella cuyas propiedades estadísticas, como la media, la varianza y la autocorrelación entre valores, se mantienen constantes a lo largo del tiempo, como ya vimos en la definición

de los modelos aditivos.

La diferenciación nos permite eliminar tendencias o patrones sistemáticos de crecimiento o decrecimiento, facilitando el modelado de las componentes autoregresivas (AR) y de media móvil (MA). A pesar de que su nombre nos pueda insinuar un proceso complejo de integración analítica, al realizarse sobre valores numéricos, no es más que una diferencia de valores:

$$y'_t = y_t - y_{t-1}$$

Este proceso puede aplicarse tantas veces como sea necesario para lograr estacionariedad. Dicho número de repeticiones viene controlado por el valor de orden d , que indica el número de veces que se ha diferenciado la serie. En general, el modelo ARIMA supone que tras aplicar d diferencias, la serie resultante $y^{(d)}$ puede ser modelada por un proceso estacionario ARMA(p, q). Por tanto, el componente I de ARIMA es un procesamiento indispensable de la serie cuando no se cumpla el requisito de estacionariedad, y permitirá calcular sobre la serie resultante las componentes AR y MA con mayor facilidad.

Para saber cuando deja de ser necesario aplicar el proceso iterativo de integración, podemos hacer uso de dos posibles mecanismos: uno gráfico, basado en el gráfico de autocorrelación de valores, y otro estadístico, basado en el test de Dickey-Fuller aumentado (ADF).

- El análisis gráfico consiste en observar el comportamiento de la función de autocorrelación (ACF) tras aplicar una o varias diferenciaciones. Si la serie es no estacionaria, los valores siguientes de autocorrelación decaen lentamente, indicando que queda información relevante en dichas componentes. Por el contrario, si la serie es estacionaria, la ACF suele caer rápidamente a cero, estableciendo que no es necesario continuar diferenciando (ver figura 2.5).

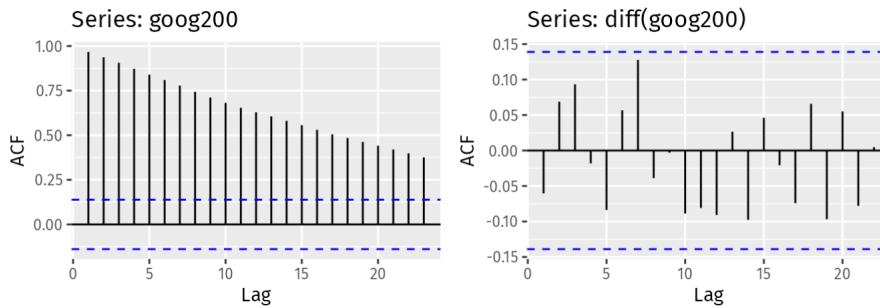


Figura 2.5.: Gráfico ACF: no estacionario (izquierda) vs estacionario (derecha) [8]

Numéricamente, la autocorrelación en un retardo k equivale a:

$$\rho_k = \frac{\text{Cov}(y_t, y_{t-k})}{\sigma^2}$$

donde σ^2 es la varianza de la serie y $\text{Cov}(y_t, y_{t-k})$ es la covarianza entre los valores actuales y los desplazados k periodos atrás.

2. Tendencias y Estado del arte

- El test ADF, por su parte, nos proporciona la misma conclusión de manera numérica, para lograr un mayor rigor estadístico en la solución. Su funcionamiento radica en la búsqueda de una raíz unitaria en la serie, en cuyo caso significa que la serie presenta comportamiento no estacionario.

De forma general, el test se basa en ajustar una regresión del tipo:

$$\Delta y_t = \alpha + \beta t + \gamma y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \delta_i \Delta y_{t-i} + \epsilon_t$$

donde $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$ representa la primera diferencia de la serie, γ es el parámetro clave para detectar la raíz unitaria, y ϵ_t es el error.

Sin embargo, lo más relevante para su uso es comprender cómo funciona el test de hipótesis. Como hipótesis nula (H_0), define que la serie no es estacionaria, es decir, que presenta una raíz unitaria, y como (H_1) podremos aceptar que la serie sea estacionaria. Para ello, basta con observar el valor de p :

- Si el **p-valor** del test es significativo se puede rechazar la hipótesis nula. En ese caso, la serie puede considerarse estacionaria, y podemos parar el proceso iterativo de diferenciación.
- Si el **p-valor** es mayor al valor de significación, no podemos rechazar la hipótesis nula, lo que indica que la serie sigue siendo no estacionaria, y debemos continuar el proceso de integración.

Componente autoregresiva (AR)

Esta parte del modelo representa la relación entre el valor actual de la serie y sus valores pasados. Supone que el valor presente puede explicarse como una combinación lineal de observaciones anteriores, los cuales se denominan retardos o lags. Normalmente, el número de lags a emplear es un hiperparámetro clave del modelo, el cual es controlado por p .

Matemáticamente, podemos expresarlo como:

$$z_t = w_1 y_{t-1} + w_2 y_{t-2} + \dots + w_p y_{t-p} + \epsilon_t$$

donde:

- w_1, w_2, \dots, w_p son los coeficientes autoregresivos que indican el peso o importancia de cada valor pasado. Cuando usamos el valor p , establecemos el número de valores con peso 1 que tomará nuestro modelo, mientras que el resto se mantienen a 0. Pero, podríamos tener variantes en las que dichos pesos fueran valores flotantes entre 0 y 1 que permitan una ponderación más refinada de los valores.
- ϵ_t es el término asociado al error en el instante t .

Gracias a la componente AR, podemos capturar relaciones de corto plazo y patrones de dependencia temporal, siempre que la serie sea estacionaria. Es habitual que muchas series temporales muestren este tipo de estructura, donde los valores pasados son predictivos del comportamiento futuro inmediato, como ya vimos con el caso de las temperaturas y el consumo eléctrico. Por tanto, la elección del parámetro p es clave: un valor pequeño implica que sólo los valores más recientes tengan influencia, mientras que un valor mayor permite capturar relaciones más amplias en el tiempo, pero puede aumentar el riesgo de sobreajuste

y se pierda localidad. En definitiva, se trata de un elemento esencial del rendimiento de ARIMA, por lo que es clave elegir adecuadamente su valor.

Componente de media móvil (MA)

Por último, nos queda describir el funcionamiento de la media móvil. Esta tiene como objetivo modelar la parte estocástica de la serie temporal, es decir, los errores de predicción cometidos en instantes anteriores. Anteriormente, vimos que la parte autoregresiva se basaba en realizar la media sobre sus mismos valores, mientras que aquí tratamos de extraer información de los residuos.

Formalmente, un modelo MA de orden q se define como:

$$y_t = \mu + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}$$

donde:

- y_t es el valor observado de la serie en el instante t ,
- μ es la media de la serie (si está centrada, puede ser cero),
- ε_t es el término de error en el instante t ,
- $\theta_1, \dots, \theta_q$ son los coeficientes del modelo MA.

Esto nos permitirá capturar patrones aleatorios que no pueden explicarse mediante una simple tendencia o correlación temporal, y por tanto, mejorando los resultados y el rendimiento del modelo, al suavizarse los errores pasados para acercarnos más a la serie real. Por tanto, el número de errores a considerar q debe escoger de manera adecuada. Para facilitar esta decisión, podemos basarnos de nuevo en dos enfoques: en emplear la información del gráfico ACF, o bien, de manera experimental:

- El análisis gráfico mediante ACF nos permite analizar el comportamiento de los lags; en un modelo MA puro, los primeros q retardos (*lags*) suelen mostrar autocorrelación significativa, pero luego suelen decrecer de manera repentina a cero. Una buena estimación puede ser tomar como valor de q el último lag con autocorrelación significativa antes del corte. Es decir, si a partir del punto $q+1$ se produce un descenso abrupto, tomamos q .
- Si la gráfica no nos proporciona una respuesta clara, y la serie es modelable en un tiempo razonable, se puede realizar una búsqueda hiperparámetros, probando diferentes valores de q , y entrenando un modelo ARIMA para cada combinación posible (junto a valores de p y d), y evaluar su rendimiento utilizando métricas como el *Mean Squared Error* (MSE). Para facilitar el proceso, podemos usar técnicas clásicas como grid search, que no es más que realizar todas las combinaciones posibles de parámetros p, q y d . Pero, de manera más avanzada, existen adaptaciones de ARIMA en frameworks como `auto_arima`, que usan una estimación automática de los hiperparámetros.

Conclusiones

En resumen, ARIMA nos permite modelar gran cantidad de problemas de manera simple, cumpliendo como única restricción la estacionariedad. Pero principalmente esta característica, si bien facilita enormemente el proceso, también impacta sobre la calidad del resultado; si

2. Tendencias y Estado del arte

la serie tiene una estructura muy compleja y no estacionaria, convertirla para que lo sea puede provocar una pérdida masiva de información, ya que al diferenciar estamos suprimiendo información que podría ser potencialmente relevante. En casos extremos, la pérdida de expresividad podría ser tal hasta lograr una serie muy plana, sin comportamientos aparentes. Por tanto, es necesario emplear técnicas más sofisticadas que no requieran dicha condición para extraer modelos más generalizables.

Por otro lado, las predicciones a largo plazo también son problemáticas: como se buscan relaciones lineales entre variables, con estaciones definidas, y variables sencillas de representar, cuando se usa ante series complejas puede tenderse a formular una predicción bastante plana y poco informativa que tienda a la media, ante la imposibilidad del modelo a adaptarse a los cambios. De manera directa, esto influye también ante la capacidad de adaptación de los outliers: ante su presencia, se podría ver alterada la predicción real, y se deben estudiar y analizar en fases previas de preprocesado.

Por último, en caso de que se disponga de información adicional, como intervalos de tiempo, localización en calendario, habitualmente usada cuando se dispone de datos de larga extensión para facilitar su estructuración y la detección de períodos, no es posible incorporarlo de forma directa. Habría que realizar modificaciones sobre este, como por ejemplo, las integradas en ARIMAX, que se basa en la implementación original [3], pero añadiendo de manera aditiva operaciones adicionales aprovechando la información externa.

2.1.1.3. Prophet

Como alternativa más reciente de los modelos aditivos, disponemos de Prophet [14]. Desarrollado por Meta, apareció teniendo como objetivo facilitar la generación de predicciones de calidad, incluso si es empleado por analistas sin experiencia en series temporales. Según su blog oficial [13], Prophet fue creado para responder a la necesidad de escalar la producción de pronósticos precisos en entornos empresariales sin necesidad de altos conocimientos para poder extraer buenas conclusiones.

Funcionamiento

A diferencia de los modelos anteriores, que definían la necesidad de cumplir ciertas restricciones, como la estacionariedad, Prophet nos permite trabajar con entornos más cambiantes, al estar diseñado para recibir datos de al menos varios meses de duración, donde si bien existen patrones estacionales claros por la estructura de tipo calendario, es capaz de adaptarse a cambios e imprevistos. Es decir, es capaz de modelar días festivos o de carácter especial sobre el impacto del desarrollo de la serie (como el lanzamiento de un nuevo servicio o producto de una empresa) y es más robusto frente a outliers que los modelos que vimos anteriormente. (ver figura 2.6).

La descomposición se basa en una suma de tres componentes, de manera similar a los modelos anteriores:

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \varepsilon_t$$

Donde:

- $g(t)$ representa la tendencia a largo plazo, que puede ser lineal o logística, y puede contener cambios de tendencia que se ajustan de manera automática.
- $s(t)$ modela la estacionalidad periódica mediante funciones basadas en series de Fourier. Permite capturar estacionalidades diarias, semanales o anuales, aunque las implementaciones disponibles permiten también especificar intervalos definidos por el usuario.
- $h(t)$ representa efectos de festividades o eventos especiales, introducidos manualmente por el usuario.
- ε_t representa el error asociado a la predicción realizada, que se asume con distribución normal.

Entrando en mayores detalles de implementación, una de las principales novedades reside en algo tan sencillo de visualizar como la tendencia. Hasta ahora, normalmente disponíamos de un modelado de única ecuación, comúnmente lineal, que era común a toda la serie. Pero Prophet es más flexible gracias a la detección automática de cambios de pendiente, los cuales denomina *changepoints*. Además, para reflejar comportamientos y cambios de tendencia de manera más suave y progresiva, permite ajustar la suavidad en torno a los changepoints mediante un parámetro de escala.

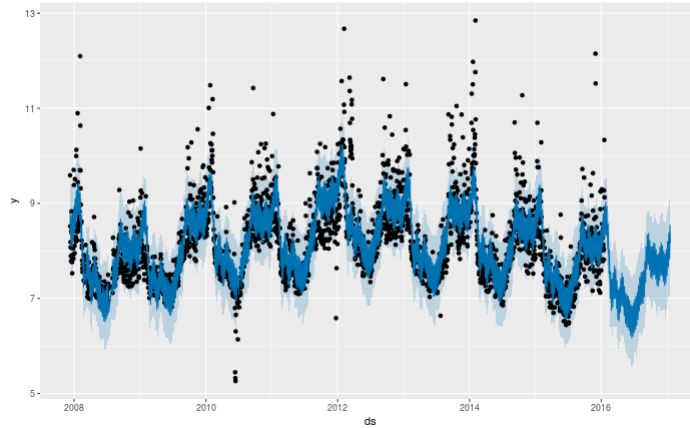


Figura 2.6.: Prophet: Ejemplo de predicción en entorno ruidoso [13]

Adicionalmente, la modelización de la estacionalidad también recibe una formulación más sofisticada. Usando Fourier, podemos introducir la duración del período de cada ciclo (P) e ir ajustando su precisión mediante el parámetro n (ver ecuación 2.1.1.3). Pero lo más interesante es que se facilita la inclusión explícita de festividades o eventos que pueden afectar significativamente la serie. Para ello, el modelo permite especificar ventanas alrededor de esos puntos para así aprender también su comportamiento.

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{P}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{P}\right) \right]$$

Conclusiones

En resumen, Prophet supone un salto considerable en cuanto a adaptación y cercanía a los datos extraídos de casos reales. Nos permite insertar la información explícita que mencionábamos en ARIMA, ya que nos permite añadir de manera muy intuitiva información adicional del problema. Además, en su publicación original se destaca la eficacia incluso cuando los datos presentan imperfecciones, como valores atípicos, datos faltantes o cambios abruptos en la tendencia, lo cual facilita enormemente el proceso de preprocesado, el cual puede reducirse al mínimo. Esto aporta considerablemente a su faceta relacionada con la facilidad de uso.

Sin embargo, aunque supone un gran salto con lo disponible anteriormente, aún se siguen manteniendo varias de las limitaciones que venimos analizando a lo largo de los modelos. En primer lugar, podemos observar que su enfoque podría verse más implicado en el ajuste de curvas que en una modelación como tal de las dependencias temporales, que nos permitan realizar forecasting a largo plazo. Si bien el modelo destaca por su sencillez al usuario, la elección de parámetros sigue siendo un aspecto delicado, ya que el modelo puede incurrir en sobreajuste si no se calibran adecuadamente. Debemos asegurarnos de sus valores estudiando previamente el conjunto de datos.

Finalmente, Prophet no incluye de manera nativa mecanismos autoregresivos ni permite modelar series multivariantes, lo cual representa una limitación cuando trabajamos con series que miden varios factores al mismo tiempo, y que incluso pueden estar correlacionados entre sí.

2.1.1.4. Comparativa final y limitaciones

A lo largo de este apartado, hemos analizado tres de los enfoques más relevantes para la descomposición de series temporales: STL, ARIMA y Prophet. Aunque todos comparten el mismo objetivo, que es separar la serie en componentes interpretables como tendencia, estacionalidad y ruido, cada uno lo aborda desde una perspectiva distinta, lo que se traduce en ventajas e inconvenientes específicos (ver tabla 2.1).

- El método **STL** nos ha resultado especialmente útil en las fases de análisis exploratorio. Su uso de suavizado local mediante Loess le permite adaptarse a estacionalidades no necesariamente fijas y proporciona una descomposición visualmente clara e interpretable. Sin embargo, al tratarse de un enfoque puramente descriptivo, su utilidad para la predicción es limitada, y se requieren herramientas adicionales.
- Por su parte, **ARIMA** representa una aproximación estadística clásica basada en la modelización de las diferentes componentes temporales de la serie. Hemos establecido que resulta eficaz en series estacionarias con comportamientos lineales, gracias a su capacidad para capturar tanto relaciones autoregresivas como de medias móviles. Pero la necesidad de afinar los hiperparámetros, la precondition de estacionariedad y su naturaleza lineal limita su rendimiento ante patrones no lineales o estacionalidades más complejas.
- Por último, **Prophet** es una solución más moderna y accesible, especialmente diseñada para aplicaciones empresariales. A diferencia de ARIMA, no exige estacionariedad y

su estructura facilita su uso por usuarios sin conocimientos especiales sobre series temporales. Sin embargo, carece de componentes autoregresivos y no modela relaciones multivariantes de forma nativa, lo que puede comprometer su versatilidad.

Característica	STL	ARIMA	Prophet
Enfoque	Suavizado Loess	Modelo estadístico autoregresivo	Modelo aditivo estructurado
Requiere estacionariedad	No	Sí	No
Componente de tendencia	Suavizado local	Parte del modelo (AR/I)	Curva lineal o logística con puntos de cambio
Modelado de estacionalidad	Suavizado periódico	Diferenciación estacional o SARIMA	Serie de Fourier
Eventos especiales	No contemplado	No los contempla	Incluidos explícitamente
Capacidad predictiva	Limitada	Buena si la serie es estacionaria y lineal	Alta en escenarios empresariales comunes
Robustez ante valores atípicos	Alta	Baja	Alta
Facilidad de uso	Media	Baja	Alta
Interpretabilidad	Muy alta	Media	Muy alta

Tabla 2.1.: Comparativa entre métodos de descomposición de series temporales

En resumen, podemos afirmar que estos modelos constituyen una base sólida para el análisis inicial de series temporales, pero enfrentamos varias dificultades con datos dinámicos, dependencias de largo plazo, series multivariantes o patrones no lineales. Es en estos contextos donde se vuelve necesaria la incorporación de modelos más avanzados, como las redes neuronales recurrentes (RNN) o incluso los Transformers, que permiten modelar dependencias temporales profundas de manera eficiente y escalar a volúmenes de datos mayores. En los apartados siguientes, analizaremos estos nuevos modelos.

2.1.2. Redes Neuronales Recurrentes

Hasta ahora, la mayoría de soluciones estudiadas se han basado en el procesamiento de un conjunto de datos de entrada, que es procesado y modelado de manera más o menos sofisticada, y se otorga una salida, como, por ejemplo, los modelos de descomposición que hemos abordado hasta ahora. No obstante, en escenarios donde las series temporales presentan relaciones no lineales complejas, múltiples escalas de dependencia y estructuras difíciles de

modelar de forma explícita, resulta necesario recurrir a modelos más avanzados.

Podríamos pensar en emplear modelos tradicionales vistos en otros ámbitos, como las redes neuronales. Pero en dichos problemas, las entradas y salidas no guardan una relación entre sí; son independientes. En los conjuntos de entrenamiento habituales, como problemas tabulares de regresión o clasificación, lo que nos importa es asignar el valor adecuado, y normalmente, cada instancia es independiente del resto. Pero cuando disponemos de información secuencial, como el lenguaje natural, o en nuestro caso, las series temporales, esto no es así.

En los métodos basados en descomposición, hemos podido apreciar que nos basamos continuamente en los valores pasados para ser capaces de modelar perdiendo la mínima información posible, y que por ejemplo, encontrar patrones como la estacionalidad es de gran importancia para minimizar el error y a su vez simplificar el modelado. Esto descarta la utilización de perceptrones multicapa, o capas densamente conectadas para el modelado de series temporales con un mínimo de complejidad, debido a dicha dependencia. Solo quizás, podríamos modelar series simples con una clara tendencia y forma, debido a que podrían asemejarse a una regresión. Pero si queremos obtener resultados escalables a redes más compleja, debemos tener en cuenta las conexiones temporales entre cada timestamp, y modelar dicho orden dentro de la secuencia global de los datos. Esto lo podemos conseguir relacionando cada salida con la anterior y es así como surge el concepto de las Redes Neuronales Recurrentes.

2.1.2.1. Funcionamiento de las RNN

Las RNN, al igual que las redes neuronales tradicionales, son capaces de procesar una entrada y arrojar una salida, modelando los datos internamente mediante sus capas ocultas. Pero la diferencia radica en la necesidad de establecer conexiones entre la salida anterior y la entrada actual. Esto se consigue con conexiones recurrentes que permiten que la información fluya de un instante al siguiente dentro de la propia red (ver figura 2.7).

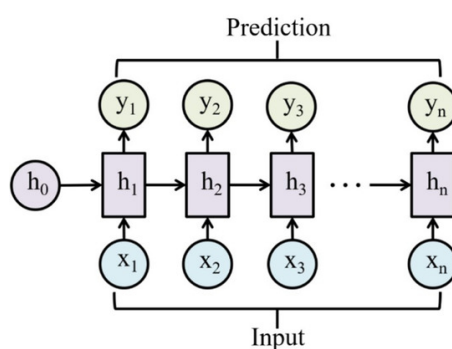


Figura 2.7.: RNN: arquitectura del modelo [12]

Estructuralmente, una RNN clásica está compuesta de tres capas principales [12]: una capa de entrada, una capa oculta con conexiones recurrentes, y una capa de salida. El comportamiento de la red se define en función de cómo se actualiza su estado interno y cómo

se generan las salidas. En su definición original, en cada instante de tiempo t , la red recibe un vector de entrada \mathbf{x}_t y actualiza su estado oculto \mathbf{h}_t según la siguiente ecuación:

$$\mathbf{h}_t = \sigma_h(\mathbf{W}_{xh}\mathbf{x}_t + \mathbf{W}_{hh}\mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_h)$$

donde:

- \mathbf{W}_{xh} es la matriz de pesos entre la entrada y la capa oculta,
- \mathbf{W}_{hh} representa la conexión recurrente entre los estados ocultos,
- \mathbf{b}_h es el vector de sesgo asociado,
- σ_h es la función de activación, normalmente la tangente hiperbólica (\tanh) o la rectificada lineal (ReLU).

A partir del estado oculto actualizado, se calcula la salida correspondiente mediante:

$$\mathbf{y}_t = \sigma_y(\mathbf{W}_{hy}\mathbf{h}_t + \mathbf{b}_y)$$

donde:

- \mathbf{W}_{hy} conecta la capa oculta con la capa de salida,
- \mathbf{b}_y es el vector de sesgo en la salida,
- σ_y es la función de activación de la salida.

Gracias principalmente al estado oculto, podemos integrar la información de entrada actual con las salidas previas, permitiendo que la red exhiba un comportamiento ordenado temporalmente en sus salidas. Pero, sin lugar a dudas, otro de los elementos clave para el funcionamiento adecuado es escoger una correcta función de activación σ_h , ya que se encarga de añadir la no linealidad a la salida. Una de las más empleadas es la tangente hiperbólica, \tanh , que permite ajustar los valores de los pesos al intervalo $[-1,1]$, el cual es bastante intuitivo gracias al estar centrado en cero, y además, permite la existencia de pesos tanto positivos como negativos.

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

También es posible encontrar ReLU o sus variantes, ya que permiten ajustar los pesos de manera computacionalmente sencilla, pero solo permite el paso de valores positivos.

$$\text{ReLU}(x) = \max(0, x)$$

Elegir una u otra opción depende del tipo de problema que tratemos de resolver o incluso del conjunto de datos de entrada, pero es un elemento clave que afecta directamente al aprendizaje de los estados ocultos y la propagación de dicha información.

2.1.2.2. Limitaciones de las RNN estándar

Aunque las RNN suponen un gran avance en el aprendizaje de datos secuenciales y permitieron una mejora considerable en los resultados, no están exentas de problemas durante el aprendizaje. Al igual que otros modelos que usan la propagación mediante gradientes,

2. Tendencias y Estado del arte

debemos tener especial cuidado con su gestión para evitar la explosión de gradientes y, en su caso, el extremo contrario, el desvanecimiento.

Estos efectos se ven potenciados debido al particular funcionamiento del algoritmo de retropropagación entre los diferentes pasos temporales. A diferencia de una red neuronal clásica, necesitamos que los pesos tengan relación también con los pasos anteriores de la secuencia, y para lograrlo, debemos modificar el proceso, de manera que podamos emplear el procedimiento habitual con la nueva estructura oculta de pesos. En cada etapa de actualización:

1. La RNN se desenrolla (*unroll*) en el tiempo durante un número finito de pasos (por ejemplo, 10).
2. Se aplica retropropagación en la red desenrollada de la manera habitual.
3. Se acumulan los gradientes de todos los pasos temporales hacia los pesos compartidos.
4. Los parámetros se actualizan con una optimización como SGD o Adam.

De esta forma, implementamos el mecanismo conocido como *Backpropagation Through Time* (BPTT). Durante el entrenamiento con este mecanismo, calculamos los gradientes de la función de pérdida respecto a los pesos de la red a lo largo de varios pasos temporales, y es al propagar cuando podemos enfrentarnos a los dos problemas ya mencionados: la explosión y el desvanecimiento del gradiente.

El desvanecimiento del gradiente se produce si los términos derivados que aparecen en el cálculo (concretamente, los productos sucesivos de matrices Jacobianas) tienen valores propios menores que uno, su multiplicación sucesiva tiende a cero. Esto provoca que los gradientes disminuyan exponencialmente a medida que retrocedemos en el tiempo, impidiendo que la red actualice adecuadamente los pesos de las capas o pasos más antiguos, y como consecuencia, la red pierde la capacidad de aprender dependencias a largo plazo, ya que el error no alcanza a modificar significativamente las entradas lejanas.

Por otro lado, la explosión del gradiente es justo el caso opuesto; si los valores propios de las Jacobianas son mayores que uno, la multiplicación produce gradientes que crecen exponencialmente. Esto puede llevar a actualizaciones de pesos excesivas, provocando inestabilidad numérica. En ambos casos, por tanto, la capacidad de aprendizaje de la red se ve comprometida, y puede perjudicar gravemente a los resultados obtenidos.

Formalmente, podemos ver reflejado este comportamiento mediante el desarrollo de los estados ocultos. A partir de la fórmula recurrente del estado oculto:

$$\mathbf{h}_t = \sigma_h (\mathbf{W}_{xh} \mathbf{x}_t + \mathbf{W}_{hh} \sigma_h (\mathbf{W}_{xh} \mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{W}_{hh} \mathbf{h}_{t-2} + \mathbf{b}_h) + \mathbf{b}_h),$$

el cálculo del gradiente de \mathbf{h}_t respecto a un estado anterior \mathbf{h}_{t-n} implica el producto de Jacobianas:

$$\frac{\partial \mathbf{h}_t}{\partial \mathbf{h}_{t-n}} = \prod_{k=t-n}^{t-1} \mathbf{J}_k,$$

donde J_k representa la matriz Jacobiana del estado oculto en el instante k . La estabilidad de estos productos depende críticamente de los valores propios de J_k , por lo que se trata del elemento clave causante de las dos problemáticas descritas.

Para tratar de solucionar este problema, podemos encontrar variantes de este algoritmo en el estado del arte. Algunas, tratan de simplemente modificar el funcionamiento de la propagación, con técnicas como el *gradient clipping*, que permiten limitar el tamaño máximo del gradiente durante la retropropagación, evitando explosiones incontroladas. Pero también podemos encontrar arquitecturas específicas como las LSTM (Long Short-Term Memory), que introducen mecanismos de control del flujo de información mediante puertas, facilitando la retención de información relevante a largo plazo y mitigando el problema desvanecimiento de gradientes de manera estructural.

2.1.2.3. LSTM

Para resolver los problemas de desvanecimiento del gradiente asociados a las RNN clásicas, Hochreiter y Schmidhuber propusieron en 1997 las *Long Short-Term Memory networks* (LSTM) [7]. La innovación clave de estas redes es la introducción de mecanismos de puertas que regulan el flujo de información a lo largo del tiempo, permitiendo mantener una memoria a largo plazo de forma más estable.

Cada célula LSTM incorpora tres compuertas principales: la compuerta de entrada, la compuerta de olvido y la compuerta de salida. Estas compuertas permiten decidir qué información se debe incorporar, qué parte del estado anterior se debe olvidar y qué parte del nuevo estado se debe transmitir a la siguiente etapa. Gracias a este diseño, las redes LSTM son especialmente eficaces para modelar dependencias temporales de largo alcance.

El comportamiento interno de una célula LSTM se puede describir mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 i_t &= \sigma(W_{xi}x_t + W_{hi}h_{t-1} + b_i) && \text{(compuerta de entrada)} \\
 f_t &= \sigma(W_{xf}x_t + W_{hf}h_{t-1} + b_f) && \text{(compuerta de olvido)} \\
 o_t &= \sigma(W_{xo}x_t + W_{ho}h_{t-1} + b_o) && \text{(compuerta de salida)} \\
 g_t &= \tanh(W_{xc}x_t + W_{hc}h_{t-1} + b_c) && \text{(nuevo contenido candidato)} \\
 c_t &= f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t && \text{(estado de la celda)} \\
 h_t &= o_t \odot \tanh(c_t) && \text{(estado oculto)}
 \end{aligned}$$

Donde σ representa la función sigmoide, \tanh la tangente hiperbólica, y \odot la multiplicación elemento a elemento. Esta arquitectura permite mantener y actualizar información relevante a lo largo del tiempo, mitigando los problemas habituales en el aprendizaje de secuencias largas.

Cada compuerta dentro de una celda LSTM desempeña una función específica en la regulación del flujo de información. La compuerta de entrada controla cuánta información del nuevo vector de entrada x_t se incorpora al estado de la celda c_t ; la compuerta de olvido determina qué parte del estado anterior c_{t-1} se retiene, y, finalmente, la compuerta de salida decide cuánta información del estado actual c_t se utiliza para calcular el estado oculto h_t .

(ver figura 2.8).

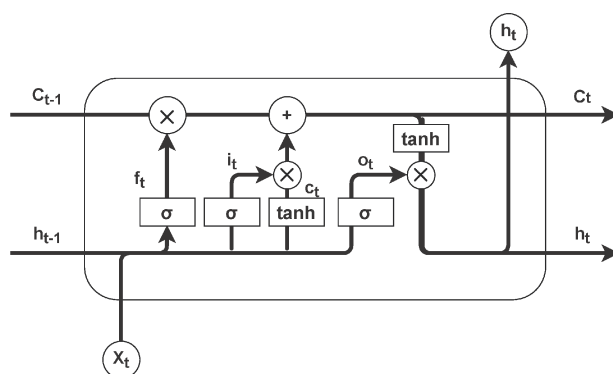


Figura 2.8.: LSTM: funcionamiento de la arquitectura de puertas

Además, la entrada candidata de la celda, denotada como g_t , representa nueva información que podría añadirse al estado de la celda tras ser modulada por la compuerta de entrada.

Gracias a estos mecanismos de control, las redes LSTM pueden decidir dinámicamente qué información conservar o descartar en cada momento, lo que les permite gestionar dependencias temporales a largo plazo de manera mucho más eficaz que las RNN convencionales. En esta arquitectura, la recurrencia se mantiene a través del estado de la celda c_t , que actúa como una cinta transportadora que permite el traspaso continuo de información entre pasos temporales. Este flujo sostenido de memoria facilita la conservación de patrones relevantes a lo largo de secuencias de larga extensión.

Las multiplicaciones elemento a elemento entre compuertas y vectores asociados aseguran una interacción eficiente entre componentes, posibilitando transformaciones complejas sin comprometer la estabilidad durante el entrenamiento. En conjunto, las LSTM mantienen un equilibrio entre flexibilidad, memoria y estabilidad en el aprendizaje.

Sin embargo, no suponen la solución definitiva a los problemas, pues, si bien conseguimos solucionar el problema de los gradientes, hemos incorporado complejidad adicional al modelo que puede afectar en diferentes aspectos:

- **Complejidad computacional:** se requieren más recursos que modelos más simples debido al uso de múltiples compuertas y operaciones por paso temporal, incrementando el número de parámetros y el tiempo de entrenamiento. Además, su estructura recurrente impide aprovechar eficientemente las GPU, y aprovechar su potencia para lograr un buen escalado.
- **Dificultad para capturar dependencias muy largas:** Aunque superan a las RNN básicas, si tratamos de modelar predicciones a largo plazo, como buscamos en este trabajo, podemos apreciar una pérdida de efectividad.
- **Sensibilidad a la configuración:** el rendimiento depende de manera sensible de los

parámetros escogidos, cuya selección no es una tarea trivial y puede afectar considerablemente a los resultados.

- **Interpretabilidad:** aunque su arquitectura muestra el flujo que sigue la información, interpretar de forma precisa el funcionamiento interno es un proceso complicado al agregar elementos adicionales como las puertas.

A modo de conclusión, aunque las LSTM representaron un avance fundamental en el ámbito del forecasting, en aplicaciones modernas suelen ser superadas por arquitecturas más flexibles y escalables como los Transformers, los cuales estudiaremos a continuación, y serán nuestro principal foco de atención.

2.1.3. Transformers

2.2. Positional Encoding en Transformers

2.3. Conjuntos de datos disponibles

3. Selección y preprocesado de los conjuntos de datos

4. Modelos de encoding posicional y entorno de trabajo

5. Análisis comparativo de positional encoding sobre las bases de datos

6. Conclusiones y trabajos futuros

A. Ejemplo de apéndice

Los apéndices son opcionales.

Este fichero `apendice-ejemplo.tex` es una plantilla para añadir apéndices al TFG. Para ello, es necesario:

- Crear una copia de este fichero `apendice-ejemplo.tex` en la carpeta `apendices` con un nombre apropiado (p.e. `apendice01.tex`).
- Añadir el comando `\input{apendices/apendice01}` en el fichero principal `tfm.tex` donde queremos que aparezca dicho apéndice (debe de ser después del comando `\appendix`).

Glosario

La inclusión de un glosario es opcional.

Archivo: `glosario.tex`

\mathbb{R} Conjunto de números reales.

\mathbb{C} Conjunto de números complejos.

\mathbb{Z} Conjunto de números enteros.

Bibliografía

- [1] R. Bommasani, D. A. Hudson, E. Adeli, R. Altman, S. Arora, S. von Arx, M. S. Bernstein, J. Bohg, A. Bosselut, E. Brunskill, E. Brynjolfsson, S. Buch, D. Card, R. Castellon, N. Chatterji, A. Chen, K. Creel, J. Q. Davis, D. Demszky, C. Donahue, M. Doumbouya, E. Durmus, S. Ermon, J. Etchemendy, K. Ethayarajh, L. Fei-Fei, C. Finn, T. Gale, L. Gillespie, K. Goel, N. Goodman, S. Grossman, N. Guha, T. Hashimoto, P. Henderson, J. Hewitt, D. E. Ho, J. Hong, K. Hsu, J. Huang, T. Icard, S. Jain, D. Jurafsky, P. Kalluri, S. Karamcheti, G. Keeling, F. Khani, O. Khattab, P. W. Koh, M. Krass, R. Krishna, R. Kudritpudi, A. Kumar, F. Ladhak, M. Lee, T. Lee, J. Leskovec, I. Levent, X. L. Li, X. Li, T. Ma, A. Malik, C. D. Manning, S. Mirchandani, E. Mitchell, Z. Muniyikwa, S. Nair, A. Narayan, D. Narayanan, B. Newman, A. Nie, J. C. Niebles, H. Nilforoshan, J. Nyarko, G. Ogut, L. Orr, I. Papadimitriou, J. S. Park, C. Piech, E. Portelance, C. Potts, A. Raghunathan, R. Reich, H. Ren, F. Rong, Y. Roohani, C. Ruiz, J. Ryan, C. Ré, D. Sadigh, S. Sagawa, K. Santhanam, A. Shih, K. Srinivasan, A. Tamkin, R. Taori, A. W. Thomas, F. Tramèr, R. E. Wang, W. Wang, B. Wu, J. Wu, Y. Wu, S. M. Xie, M. Yasunaga, J. You, M. Zaharia, M. Zhang, T. Zhang, X. Zhang, Y. Zhang, L. Zheng, K. Zhou, and P. Liang. On the opportunities and risks of foundation models, 2022.
- [2] G. E. P. Box and G. Jenkins. *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. Holden-Day, Inc., USA, 1990.
- [3] G. E. P. Box and G. M. Jenkins. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco, 1970.
- [4] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day, 1976. AirPassengers dataset.
- [5] R. B. Cleveland, W. S. Cleveland, J. E. McRae, and I. Terpenning. Stl: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 6(1):3–73, 1990.
- [6] S. Hochreiter and J. Schmidhuber. Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8):1735–1780, 1997.
- [7] S. Hochreiter and J. Schmidhuber. Long short-term memory. *Neural Comput.*, 9(8):1735–1780, Nov. 1997.
- [8] R. J. Hyndman and G. Athanasopoulos. *Forecasting: Principles and practice - stationarity and differencing*, 2021. Accedido el 31 de julio de 2025.
- [9] H. Irani and V. Metsis. Positional encoding in transformer-based time series models: A survey, 2025.
- [10] A. Kibar. U.s. housing starts. u.s. building permits. <https://blog.techcharts.net/index.php/2012/06/19/u-s-housing-starts-u-s-building-permits/>, 2012. Consultado el 25 de julio de 2025.
- [11] N. Kitaev, Łukasz Kaiser, and A. Levskaya. Reformer: The efficient transformer, 2020.
- [12] I. D. Mienye, T. G. Swart, and G. Obaido. Recurrent neural networks: A comprehensive review of architectures, variants, and applications. *Information*, 15(9), 2024.
- [13] S. J. Taylor and B. Letham. Prophet: Forecasting at scale, 2017. Facebook Research Blog. Revisado el 30/07/2025.
- [14] S. J. Taylor and B. Letham. Forecasting at scale. *The American Statistician*, 72(1):37–45, 2018.
- [15] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, L. Kaiser, and I. Polosukhin. Attention is all you need, 2023.
- [16] H. Zhou, S. Zhang, J. Peng, S. Zhang, J. Li, H. Xiong, and W. Zhang. Informer: Beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting, 2021.