

Trabajo Práctico 3

Aprendizaje Automático Avanzado

Cisnero Matias, Seivane Nicolás, Serafini Franco
17 de Noviembre de 2025

Este trabajo práctico tiene como objetivo analizar e implementar dos variantes arquitectónicas de Transformadores para traducción automática español-inglés.

Contexto

Los Transformadores representan un gran avance en el campo del Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN). En este contexto los mismos constituyen el estado del arte actual para el aprendizaje de Modelos de Grandes Lenguajes (LLM).

Para realizar traducción automática, los Transformadores implementan el modelo de secuencia a secuencia (seq2seq), que es capaz de obtener una secuencia de salida dada una secuencia de entrada, independientemente de la longitud de ambas. Estos sistemas son entrenados a partir de pares de oraciones, una de ellas en el lenguaje fuente y la otra en el lenguaje objetivo.

El traductor esta compuesto por dos Transformadores:

- Codificador: Procesa la secuencia de entrada y genera representaciones contextuales enriquecidas.
- Decodificador: Genera la secuencia de salida token por token, utilizando la información proporcionada por el Codificador.

Durante el entrenamiento se busca maximizar la probabilidad:

$$P(y_1, y_2, \dots, y_m \mid x_1, x_2, \dots, x_n)$$

donde x es la oración a traducir e y es la oración traducida.

Embeddings y Codificación Posicional

Cada token se representa mediante:

- **Matriz E:** $E \in \mathbb{R}^{|V| \times d}$ donde cada fila contiene la representación contextual de una palabra.
- **Codificación One-Hot:** Se multiplica por E para obtener el embedding correspondiente.

Debido a que la posición de las representaciones contextuales en una entrada aporta información acerca de la relación entre ellas, se le suma a cada token un vector de la misma dimensión d , cuyo valor depende de la posición del token en la secuencia de entrada. La función para obtener dichos vectores es:

$$vp(p, j) = \begin{cases} \sin\left(\frac{p}{10000^{2j/d}}\right) & \text{si } j \text{ es par} \\ \cos\left(\frac{p}{10000^{(2j-1)/d}}\right) & \text{si } j \text{ es impar} \end{cases}$$

Mecanismo de Auto-atencion

Cada token adopta tres roles:

- **Consulta (Query):** El token es transformado para poder ser comparado con otras palabras de la entrada.
- **Clave (Key):** El token es transformado para poder ser comparado con la palabra en foco.
- **Valor (Value):** El token es transformado para poder calcular el valor final de la representación de cada palabra.

Así, las representaciones de las palabras según sus roles son:

$$q_i = x_i W^Q,$$

$$k_i = x_i W^K,$$

$$v_i = x_i W^V$$

Mecanismo de Auto-Atención

Calculo de la nueva representación contextual a_i

La nueva representación contextual a_i para cada token se calcula como:

$$a_i = \sum_{j \leq i} \alpha_{i,j} v_j = \sum_{j \leq i} \text{softmax} \left(\frac{q_i k_j}{\sqrt{d_k}} \right) v_j$$

Atención Múltiple

Múltiples cabezales permiten al modelo capturar diferentes tipos de relaciones lingüísticas como relaciones sintácticas o semánticas.

Cada cabezal k tiene sus propias matrices de pesos:

$$Q_k = XW_k^Q, \quad K_k = XW_k^K, \quad V_k = XW_k^V$$

Y cada cabezal calcula:

$$Y_k = \text{softmax} \left(\frac{Q_k K_k^t}{\sqrt{d_k}} \right) V_k$$

Mecanismo de Auto-Atencion

Concatenación:

$$A = (Y_1 + ' Y_2 + ' \dots + ' Y_h) W^O$$

donde $Y_k \in \mathbb{R}^{N \times d_v}$ es la salida del cabezal k , la concatenación produce una matriz de $N \times h d_v$, y $W^O \in \mathbb{R}^{h d_v \times d}$ deja la salida de dimension $N \times d$.

Capa de PMC y Normalización

Capa de N Perceptrones Multicapa (PMC)

Cada bloque contiene una capa de N PMCs con:

- Dimensión d_{ff} .
- Función de activación GELU.
- Los pesos son compartidos entre todos los tokens.

Normalización por Capa:

- Calcula la media y la desviación sobre los elementos del vector de representación de cada token.
- Aplica la transformación lineal $\gamma x + \beta$ donde γ y β son parámetros aprendidos durante el entrenamiento.

Conexiones residuales:

- Son conexiones directas entre la entrada de cada capa y su salida correspondiente.
- Se aplican tanto a la capa de Auto-Atención como a la de PMC.

Conjunto de Datos Utilizados

Common Crawl

Es una organización sin fines de lucro que rastrea la web y ofrece un repositorio masivo y gratuito de datos de rastreo web para investigadores, empresas y público en general. Estos datos, que incluyen petabytes de páginas web, se almacenan en Amazon Web Services (AWS) y se actualizan periódicamente.

¡¡Problema!!

Las millones de páginas están guardadas en el lenguaje de marcado (HTML).

¿**La solución?** Hay varias bases de datos con estos HTML's depurados, que luego pueden ser utilizados como *tokens* para diferentes modelos de lenguajes.

¿Como se guardan los parámetros aprendidos? - Implementación 'a'

En la implementación 'a' el modelo se guarda usando la función `model.save()` de Keras, la cual almacena la arquitectura completa del modelo, junto con los pesos entrenados. Esto se realiza en el archivo `a10.py` con la siguiente línea de código:

```
model.save("eng-fra-transformer.keras")
```

Para cargar el modelo utiliza:

```
with tf.keras.utils.custom_object_scope(custom_objects):  
    model = tf.keras.models.load_model("eng-fra-transformer.keras")
```

¿Como se guardan los parámetros aprendidos? - Implementación 'p'

En la implementación p el modelo se almacena de forma modular.
En el archivo p9.py se genera el archivo ing-esp.pkl, que contiene:

- Las oraciones limpias en inglés.
- Las oraciones limpias en español.

El tokenizador se guarda en el archivo p10.py mediante:

```
self.save_tokenizer(enc_tokenizer, 'enc')  
self.save_tokenizer(dec_tokenizer, 'dec')
```

Lo cual produce los archivos:

- enc_tokenizer.pkl
- dec_tokenizer.pkl

¿Como se guardan los parámetros aprendidos? - Implementación 'p'

Pesos del modelo

La implementación **p** guarda los parámetros mediante TensorFlow Checkpoints, como se ve en el archivo p11.py:

```
ckpt = train.Checkpoint(model=training_model ,  
optimizer=optimizador)  
ckpt_manager = train.CheckpointManager(ckpt, "./  
checkpoints", max_to_keep=3)
```

¿Como se guardan los parámetros aprendidos? - Implementación 'p'

Durante el entrenamiento, después de cada época se almacena:

```
save_path = ckpt_manager.save()
```

Se guardan:

- Los pesos del codificador.
- Los pesos del decodificador.
- El estado del optimizador Adam.

Para restaurar un entrenamiento previo se utiliza:

```
ckpt.restore(ckpt_manager.latest_checkpoint)
```

Implementación de la capa de multi-auto-atención - Implementación 'a'

En la implementación 'a' el mecanismo de **multi-auto-atención** se implementa usando `tf.keras.layers.MultiheadAttention` de TensorFlow:

```
def self_attention(input_shape, prefix="att", mask=False, **kwargs):
    inputs = tf.keras.layers.Input(shape=input_shape,
                                     dtype='float32',
                                     name=f"{prefix}_in1")
    attention = tf.keras.layers.MultiHeadAttention(name=f"{prefix}_attn1", **kwargs)
    # ...
```

```
def cross_attention(input_shape, context_shape, prefix="att", **kwargs):
    context = tf.keras.layers.Input(shape=context_shape,
                                      dtype='float32',
                                      name=f"{prefix}_ctx2")
    inputs = tf.keras.layers.Input(shape=input_shape,
```

Implementación de la capa de multi-auto-atención - Implementacion 'p'

En la implementación 'p' la capa de multi-auto-atención se implementa manualmente:

```
class MultiAutoAtencion(Layer):
    def __init__(self, cabezales, d_k, d_v, d, **kwargs):
        self.atencion = AutoAtencion()
        self.cabezales = cabezales
        self.d_k = d_k
        self.d_v = d_v
        self.d = d
        self.W_q = Dense(d)
        self.W_k = Dense(d)
        self.W_v = Dense(d)
        self.W_o = Dense(d)
```


Punto 6 - Implementación 'a' - Obtención del Vocabulario

En la implementación 'a' el vocabulario se obtiene usando TextVectorization de Keras:

```
eng_vectorizer = TextVectorization(  
    max_tokens=vocab_size_en,  
    output_mode="int",  
    output_sequence_length=seq_length,  
)  
  
# Adaptacion con datos de entrenamiento  
train_eng_texts = [pair[0] for pair in train_pairs]  
eng_vectorizer.adapt(train_eng_texts)
```

Proceso:

- Se crea una capa TextVectorization con tamaño máximo de vocabulario
- La capa automáticamente construye el vocabulario
- Se guarda junto con el modelo en el archivo vectorize.pickle

Punto 6 - Implementación 'p' - Obtención del Vocabulario

En la implementación 'p' el vocabulario se obtiene usando Tokenizer de Keras:

```
def create_tokenizer(self, dataset):  
    tokenizer = Tokenizer()  
    tokenizer.fit_on_texts(dataset)  
    return tokenizer  
  
# Uso para encoder y decoder  
enc_tokenizer = self.create_tokenizer(train[:, 0])  
dec_tokenizer = self.create_tokenizer(train[:, 1])
```