

# Proyecto de Investigación

Cristhiam Daniel Campos Julca

7 de septiembre de 2022

## 1. Arreglo Fotovoltaico

Se toma como referencia el panel Sunset PX 72, el cual cuenta con 72 celdas de silicio polycristalino. Con la finalidad de obtener una potencia aproximada de 4.073 kW se colocan cuatro paneles en serie y tres en paralelo.

En la siguiente tabla se pueden observar los datos proporcionados por el panel a condiciones estándar de prueba, bajo una temperatura de 298.15 K equivalente a 25° C y una radiación de 1000 W/m<sup>2</sup>.

Datos bajo condiciones estándar	STD
Potencia en el punto máximo ( $P_{max}$ )	340 W
Tensión en circuito abierto ( $V_{oc}$ )	47.4 V
Tension en el punto de maxima potencia ( $V_{mpp}$ )	38.4 V
Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ )	9.35 A
Corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{mpp}$ )	8.84 A
Numero de celdas ( $N_s$ )	72
Coeficiente de Temperatura ( $I_{sc}$ )	0.037 % /K
Coeficiente de Temperatura ( $V_{oc}$ )	-0.32 % /K
Resistencia en serie ( $R_s$ )	0.39 $\Omega$
Resistencia en paralelo ( $R_{sh}$ )	545.82 $\Omega$

## 2. Modelo de los 5 Parámetros

El modelo eléctrico del panel fotovoltaico se representa mediante el modelo de los 5 parámetros, representado en la siguiente figura:

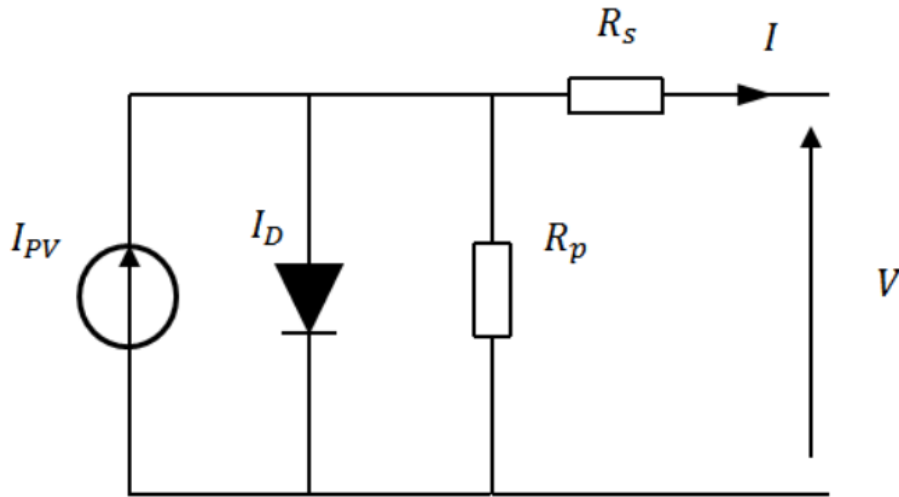


Figura 1: Modelo eléctrico de los 5 parámetros

Este modelo es seleccionado ya que proporciona un buen equilibrio entre complejidad y precisión. El comportamiento matemático de este modelo se encuentra definido por la ecuación:

$$I = I_{PV} - I_D - I_P = I_{PV} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_S}{N_S \dot{a} V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_p}$$

## 3. Simulación Matlab/Simulink

Para la simulación se divide en 4 fases:

1. Entradas constantes
2. Temperatura constante e irradiancia variable
3. Irradiancia constante y temperatura variable
4. Entradas variables

En simulink se diseño diferentes subsistemas que corresponden a cada ecuación que gobierna el modelo de la siguiente manera:

- Subsistema General

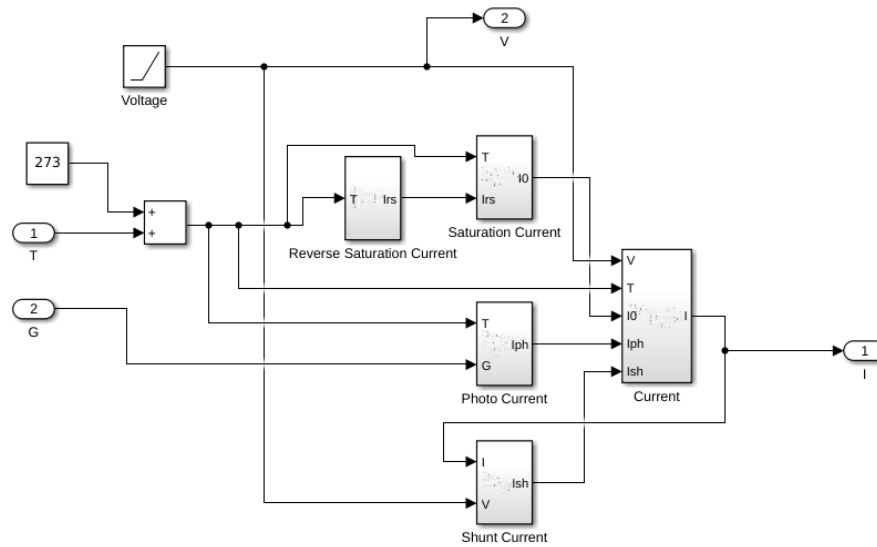


Figura 2: Sub-sistemas del modelo

- Fotocorriente

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i \times (T - 298)) \times (G/1000)$$

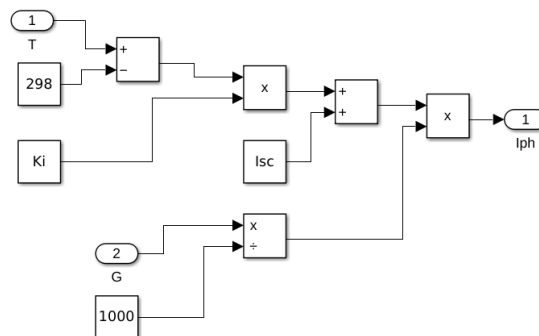


Figura 3: Subsistema para Fotocorriente

- Corriente de saturación

$$I_o = I_{rs} \times \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \times \exp((q \times E_{go} \times (1/T_n - 1/T)) / (n \times k))$$

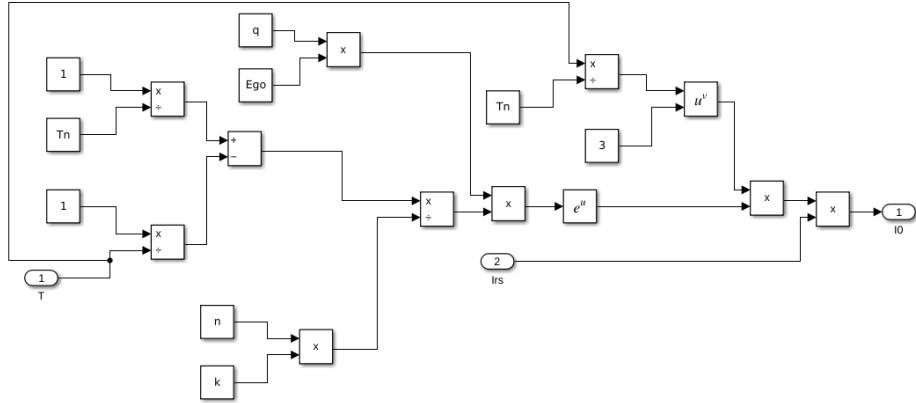


Figura 4: Subsistema de Corriente de saturación

- Corriente de saturación reversa

$$I_{rs} = I_{sc} / (\exp((q * V_{oc}) / (n * N_s * k * T)) - 1)$$

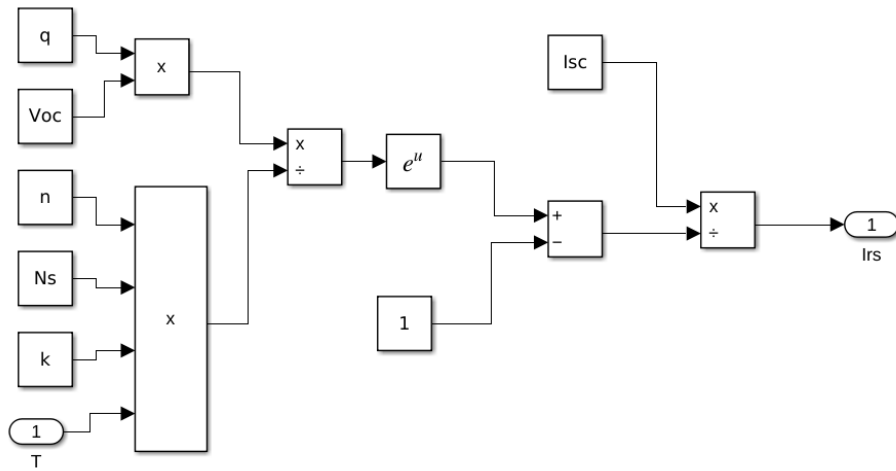


Figura 5: Subsistema de Corriente de saturación reversa

- Corriente shunt

$$I_{sh} = (V + I * R_s) / R_{sh}$$

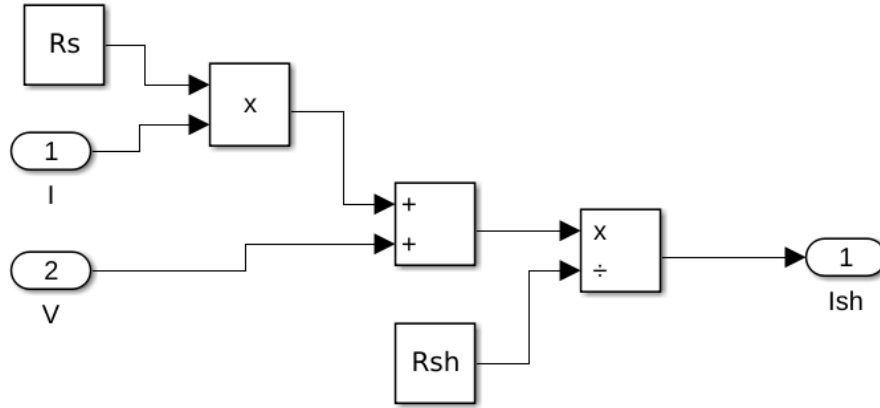


Figura 6: Subsistema de la corriente shunt

- Corriente de salida

$$I = I_{ph} * NP - I_o * NP * (\exp((q * (V / NS + I * R_s / NP)) / (n * N_s * k * T)) - 1) - I_{sh}$$

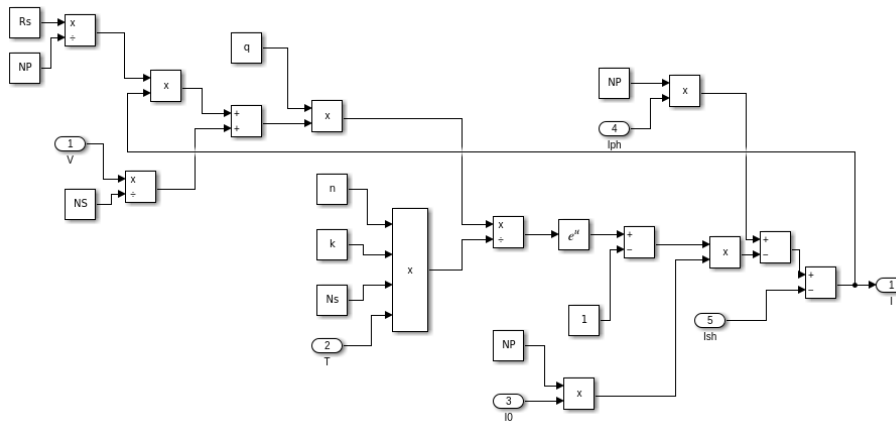


Figura 7: Subsistema de la corriente de salida

### 3.1. Temperatura e Irradiancia Constante

Para esta primera simulación se considera las entradas constantes, es decir una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  y una irradiancia de  $1000\text{ W/m}^2$

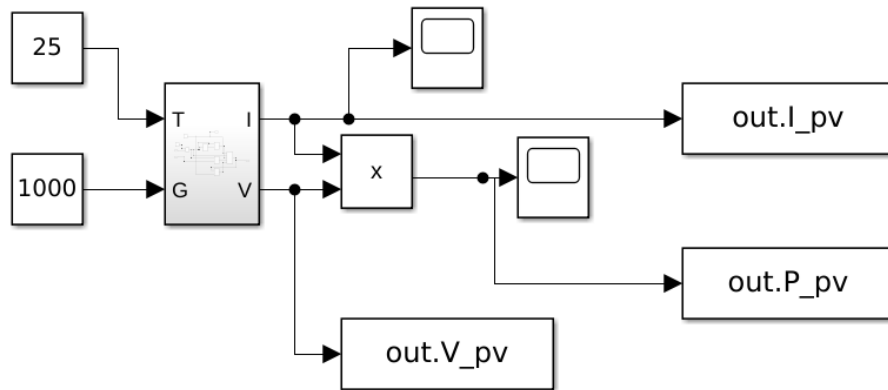


Figura 8: Arreglo PV

Se exportan los resultados generados y se guardan de manera local en un archivo: *outputPV.txt*, el cual consta de dos columnas de datos recolectados de la tensión y la corriente del arreglo fotovoltaico.

Las curvas características que se obtienen del arreglo fotovoltaico son:

```
1 # Funcion para obtener las curvas caracteristicas
2 # VI - PV
3 def curvaCaracteristica():
4     global vpp, ipp, ppp
5     pmm = PMM()
6     v = df.V_pv
7     i = df.I_pv
8     p = df.P_pv
9     vpp = pmm['V_pv']
10    ipp = pmm['I_pv']
11    ppp = pmm['P_pv']
12
13    fig, ax1 = plt.subplots()
14
15    color = "tab:red"
16    ax1.set_xlabel("Tension (V)")
17    ax1.set_ylabel("Corriente (A)", color=color)
18    ax1.plot(v, i, color=color)
19    ax1.plot(vpp, ipp, marker="o", color="black")
20    ax1.tick_params(axis="y", labelcolor=color)
21    ax1.set_xlim(0,200)
```

```

22 ax1.set_ylim(0,40)
23 ax2 = ax1.twinx()
24
25 color = "tab:blue"
26 ax2.set_ylabel("Potencia (W)", color=color)
27 ax2.plot(v, p, color=color)
28 ax2.plot(vpp, ppp, marker="o", color="black")
29 ax2.tick_params(axis="y", labelcolor=color)
30 ax2.set_xlim(0,200)
31 ax2.set_ylim(0,4000)
32
33 fig.tight_layout()
34 plt.grid()
35
36 plt.show()

```

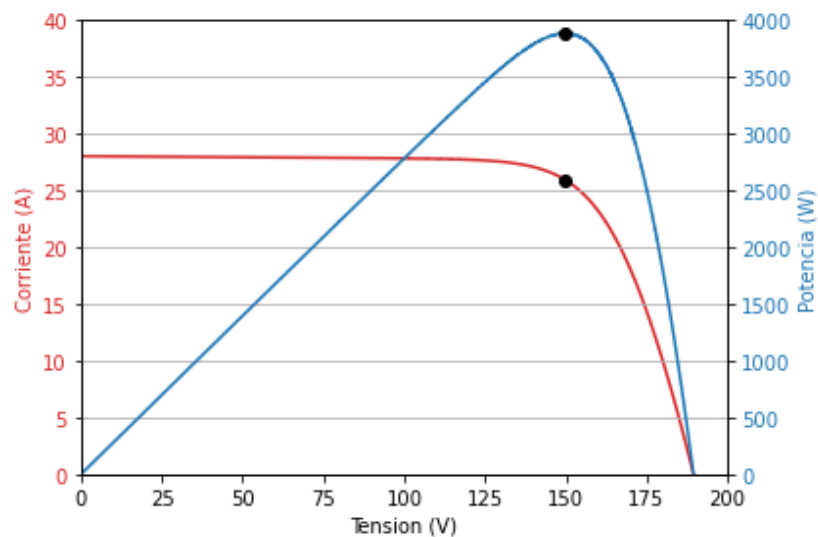


Figura 9: Curvas características

Se extrae el punto de máxima potencia ubicado en la posición usando la siguiente función:

```

1 # Funcion obtencion de puntos de maxima potencia
2 def PMM():
3     df_mask = df['P_pv']==df['P_pv'].max()
4     filtered_df = df[df_mask]
5
6     return filtered_df

```

Indice	$V_{pv}$	$I_{pv}$	$P_{pv}$
149755	149.76	25.944	3885.37344

Queremos obtener una función de la potencia que dependa de la tensión,  $p = f(v)$  que se ajuste lo mejor posible a los valores experimentales. Una vez establecido la función a ajustar se determinan sus parámetros, en el caso de un polinomio, serán los coeficientes del polinomio de modo que los datos experimentales se desvíen lo menos posible de la fórmula empírica.

En python se hace uso de la función `numpy.poly1d()` que nos ayuda a definir una función polinomial de la siguiente manera:

```
1 # funcion para calcular el modelo de la curva ajustada
2 def model(x,y,degree):
3     model = np.poly1d(np.polyfit(x, y, degree))
4     return model
```

Ahora el criterio a evaluar experimentalmente es el siguiente:

- Se toma como criterio el punto de máxima potencia ubicado en el índice 149755
- Se crea un arreglo [10, 20, 30, 40, 50] en donde cada elemento corresponde a un rango, es decir: para el elemento 10 entonces el rango a evaluar sería  $149755 \pm 10 * 1000$
- Se crea un arreglo que corresponde a los grados de ajuste del modelo: [3, 5, 7]. Se toman grados impares ya que la curva a modelar se ajusta perfectamente a este tipo de funciones.
- Por lo tanto se obtiene 15 modelos polinómicos para el primer trozo de la función y otros 15 modelos para el segundo trozo.
- Para seleccionar la función que mejor se ajusta al modelo, se evaluó la tensión en el punto de máxima potencia y se calcula un error de aproximación para poder escoger el menor de ellos.

El resultado de los modelos para el primer trozo de la función es:

```
1 """
2 Modelos del primer trozo:
3
4 modelo 0 :
5           3           2
6 -0.0003277 x + 0.05629 x + 25.34 x + 25.09
7
8 modelo 1 :
9           3           2
10 -0.0003279 x + 0.05635 x + 25.34 x + 25.11
11
```



```

12 modelo 2 :
13          3          2
14 -0.0003282 x + 0.0564 x + 25.33 x + 25.14
15
16 modelo 3 :
17          3          2
18 -0.0003285 x + 0.05645 x + 25.33 x + 25.16
19
20 modelo 4 :
21          3          2
22 -0.0003287 x + 0.0565 x + 25.33 x + 25.19
23
24 modelo 5 :
25          5          4          3          2
26 -9.224e-08 x + 2.863e-05 x - 0.003155 x + 0.1441 x + 25.48 x
27 + 10.2
28
29 modelo 6 :
30          5          4          3          2
31 -9.23e-08 x + 2.865e-05 x - 0.003158 x + 0.1442 x + 25.48 x +
32 10.21
33
34 modelo 7 :
35          5          4          3          2
36 -9.237e-08 x + 2.867e-05 x - 0.003161 x + 0.1444 x + 25.48 x
37 + 10.22
38
39 modelo 8 :
40          5          4          3          2
41 -9.243e-08 x + 2.869e-05 x - 0.003163 x + 0.1445 x + 25.48 x
42 + 10.23
43
44 modelo 9 :
45          5          4          3          2
46 -9.25e-08 x + 2.871e-05 x - 0.003166 x + 0.1446 x + 25.47 x +
47 10.24
48
49 modelo 10 :
50          7          6          5          4
51          3
52 -1.481e-11 x + 6.51e-09 x - 1.139e-06 x + 0.0001002 x -
53 0.004614 x
54          2
55 + 0.1031 x + 27.05 x + 2.176
56
57 modelo 11 :
58          7          6          5          4
59          3
60 -1.482e-11 x + 6.514e-09 x - 1.14e-06 x + 0.0001002 x -

```

```

53      0.004618 x
54      2
55      + 0.1032 x + 27.05 x + 2.178
56 modelo 12 :
57      7      6      5      4
58      3
59      -1.483e-11 x + 6.518e-09 x - 1.14e-06 x + 0.0001003 x -
60      0.004621 x
61      2
62      + 0.1033 x + 27.05 x + 2.18
63 modelo 13 :
64      7      6      5      4
65      3
66      -1.484e-11 x + 6.522e-09 x - 1.141e-06 x + 0.0001004 x -
67      0.004625 x
68      2
69      + 0.1034 x + 27.05 x + 2.182
70 modelo 14 :
71      7      6      5      4
72      3
73      -1.484e-11 x + 6.526e-09 x - 1.142e-06 x + 0.0001005 x -
74      0.004628 x
75      2
76      + 0.1035 x + 27.05 x + 2.185
77 """

```

El resultado de los modelos para el segundo trozo de la función es:

```

1  """
2  Modelos del segundo trozo:
3
4  modelo 0 :
5      3      2
6      -0.005694 x - 0.04569 x + 412.8 x - 3.782e+04
7
8  modelo 1 :
9      3      2
10     -0.005703 x - 0.04091 x + 411.9 x - 3.777e+04
11
12  modelo 2 :
13     3      2
14     -0.005712 x - 0.03614 x + 411.1 x - 3.772e+04
15
16  modelo 3 :
17     3      2
18     -0.005721 x - 0.03136 x + 410.2 x - 3.767e+04
19

```

```

20 modelo 4 :
21      3      2
22 -0.00573 x - 0.02659 x + 409.4 x - 3.762e+04
23
24 modelo 5 :
25      5      4      3      2
26 -4.23e-06 x + 0.004113 x - 1.586 x + 300.3 x - 2.787e+04 x +
      1.018e+06
27
28 modelo 6 :
29      5      4      3      2
30 -4.226e-06 x + 0.004109 x - 1.585 x + 300.1 x - 2.785e+04 x +
      1.018e+06
31
32 modelo 7 :
33      5      4      3      2
34 -4.222e-06 x + 0.004105 x - 1.583 x + 299.9 x - 2.783e+04 x +
      1.017e+06
35
36 modelo 8 :
37      5      4      3      2
38 -4.218e-06 x + 0.004101 x - 1.582 x + 299.6 x - 2.781e+04 x +
      1.016e+06
39
40 modelo 9 :
41      5      4      3      2
42 -4.213e-06 x + 0.004098 x - 1.581 x + 299.4 x - 2.779e+04 x +
      1.015e+06
43
44 modelo 10 :
45      7      6      5      4      3
46 3.314e-09 x - 4.157e-06 x + 0.002226 x - 0.6593 x + 116.6 x
47      2
48 - 1.23e+04 x + 7.167e+05 x - 1.781e+07
49
50 modelo 11 :
51      7      6      5      4      3
52 3.313e-09 x - 4.156e-06 x + 0.002226 x - 0.6591 x + 116.5 x
53      2
54 - 1.229e+04 x + 7.165e+05 x - 1.78e+07
55
56 modelo 12 :
57      7      6      5      4      3
58 3.312e-09 x - 4.155e-06 x + 0.002225 x - 0.6589 x + 116.5 x
59      2
60 - 1.229e+04 x + 7.163e+05 x - 1.779e+07
61
62 modelo 13 :
63      7      6      5      4      3

```

```

64 3.311e-09 x - 4.154e-06 x + 0.002224 x - 0.6587 x + 116.5 x
65      2
66 - 1.229e+04 x + 7.161e+05 x - 1.779e+07
67
68 modelo 14 :
69      7      6      5      4      3
70 3.31e-09 x - 4.152e-06 x + 0.002224 x - 0.6585 x + 116.4 x
71      2
72 - 1.228e+04 x + 7.159e+05 x - 1.778e+07
73
74 " " "

```

Posteriormente se calcula el error de ajuste, evaluando la tensión en el punto de máxima potencia en la función obtenida, con respecto al verdadero valor de potencia máxima. Para lo cual se obtiene que los mejores modelos corresponden al modelo 10 y el modelo 0 para el primer y segundo trozo respectivamente. Por lo tanto la función final es:

$$p(v) = \begin{cases} -1,481 \times 10^{-11}v^7 + 6,51 \times 10^{-9}v^6 - 1,139 \times 10^{-16}v^5 \\ +0,0001002v^4 - 0,004614v^3 + 0,1031v^2 + 27,05v + 2,176 & \text{Si } 0 \leq v \leq v_{mpp} \\ -0,005694v^3 - 0,04569v^2 + 412,8v - 3,7821 \times 10^4 & \text{Si } v_{mpp} < v \leq 200 \end{cases}$$

Si graficamos la función obtenida y la sobreponemos sobre la original (rojo) se tiene:

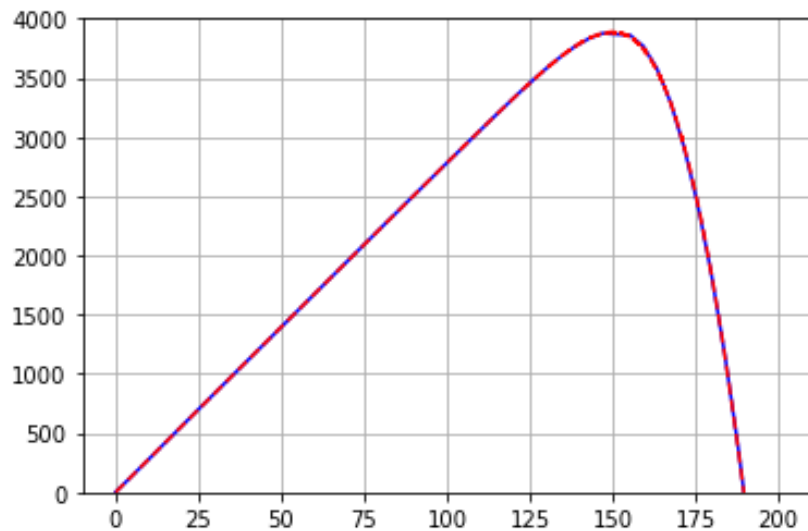


Figura 10: modelo 1 vs original