
APLICACIÓNS DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL (AOP)

Docencia de laboratorio, Grao en Robótica. EPSE de Lugo. USC.

Neste experimento estudaremos o funcionamento do amplificador operacional (AOP) con diversos montaxes tanto en configuración de lazo aberto como en retroalimentación negativa. Tamén se propoñerá aos estudantes experimentos que combinan o uso de AOP e a placa Arduíno.

Índice

1. Obxectivos	3
2. Material dispoñible no laboratorio	3
3. Material que debe traer o alumno	3
4. Fundamentos teóricos	3
4.1. Amplificador operacional en lazo aberto	6
4.2. Amplificador operacional en lazo pechado	7
5. Parte experimental	9
5.1. Proxecto 1: AOP en lazo aberto	9
5.2. Proxecto 2: AOP en lazo pechado	11
5.3. Proxecto 3: DAC con Arduino e AOP	13
5.3.1. Explicación do PWM e o Duty Cycle	14
5.3.2. Ciclo traballo e valor medio	14
5.3.3. Valor medio e filtro	15
5.3.4. Construír o circuío cun filtro paso-baixa	15
5.3.5. Usando o circuío	16
A. Pautas experimentais a seguir	18
B. Programa Arduino para enviar datos porto serie do DAC	19
C. Programa Python que recolle datos porto serie e os representa dinamicamente	20

1. Obxectivos

- Estudar o comportamento do AOP en distintos modos de funcionamento.
- Aprender a analizar o comportamento teórico do AOP e verificalo experimentalmente.
- Practicar o uso do multímetro e do osciloscopio para obter medidas de interese.
- Familiarizar o uso dun microcontrolador en combinación con configuración de AOPs.

2. Material dispoñible no laboratorio

- Aparellos de medida: osciloscopio e multímetro.
- Xerador de funcións de amplitude e frecuencia variable.
- Fontes de alimentación de corrente continua.
- Paca de inserción.
- Clasificador con elementos pasivos necesarios.
- Placa Arduino Mega e un ordenador.
- Panel de inserción.

3. Material que debe traer o alumno

- Guión da práctica, lapis e papel.
- Un pendrive (por comodidade pero non obrigatorio).

4. Fundamentos teóricos

O AOP é un dispositivo lineal que se define como un amplificador de tensión de elevada ganancia, cunha entrada *diferencial* e saída única (Figura 1). As súas propiedades fan del un dispositivo de amplo uso en tarefas de acondicionamento de sinais ou para realizar operacións matemáticas (suma, resta, integración, diferenciación, etc.).

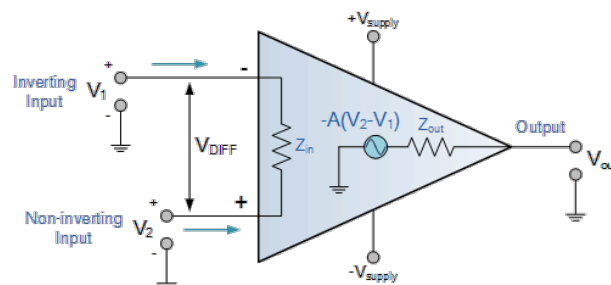


Figura 1: Modelo eléctrico equivalente dun AOP ideal.

Como dixemos, un AOP é un dispositivo amplificador (precisa de alimentación de corrente continua $\pm V_{supply}$) de moi alta ganancia (A). Está deseñado para ser usado con compoñentes de retroalimentación externos entre os seus terminais de saída e entrada. As compoñentes de retroalimentación (resistencias, condensadores, díodos, etc.) determinan a función ou operación resultante do AOP (de aí seu nome de *amplificador operacional*).

O AOP en funcionamento lineal, a tensión de saída é igual á diferenza entre as tensións de entrada multiplicada pola ganancia A, e dependente da impedancia de carga Z_{carga} ,

$$\begin{aligned} V_{in} &= (V_2 - V_1) = I_{in}Z_{in}. \\ V_{out} &= AV_{in} \frac{Z_{carga}}{Z_{out} + Z_{carga}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Para facilitar o análise adóitase empregar un modelo simplificado do AOP, denominado *amplificador ideal* (Figura 1), cuxas características son:

- Impedancia de entrada infinita.
- Impedancia de saída nula.
- Ganancia infinita.
- Debido á elevada impedancia de entrada, pódese considerar que polos terminais de entrada *non circula* intensidade.
- Aínda que realmente os AOP rais dispoñen dunha baixa impedancia de saída, sempre que dita impedancia sexa moito menor que a de carga ($Z_{out} \ll Z_{carga}$), pódese considerar que a tensión de saída non depende da carga ($V_{out} = AV_{in}$).
- Por último, debido á elevada ganancia do dispositivo (cando está a funcionar en zona lineal), pódese considerar que a tensión diferencial de entrada é nula.

A pesar de que o modelo ideal anteriormente comentado é de gran utilidade, é necesario puntualizar que existen un conxunto de limitacións que é necesario coñecer, entre as que destacamos:

- **Saturación:** A tensión de saída está limitada polas tensións de alimentación do dispositivo. No caso de que o dispositivo alcance a saturación, deixará de funcionar linealmente e a tensión diferencial de entrada deixará de ser nula.
- **Rango de saída:** A miúdo a tensión de saída satura antes de chegar ás tensións de alimentación, polo que o rango de tensións á saída aparece reducido. Existe un tipo especial de operacionais modernos que non teñen esta limitación, os AOPs *rail-to-rail* poden alcanzar as tensións de alimentación, polo que teñen un rango de saída completo.
- **Slew-Rate:** Isto ten que ver con que os AOPs non poden cambiar o voltaxe de saída instantaneamente. Polo tanto, as variacións da tensión de saída están limitadas, calquera cambio na entrada a unha taxa superior, aparecerá coa taxa límite á saída. Esta característica débese ás capacidades internas de compensación do dispositivo e forma parte do comportamento non lineal do mesmo.

- **Comportamento frecuencial limitado:** todos os dispositivos reais posúen limitacións frecuenciais, e os AOPs non son unha excepción. A maior parte dos AOPs son dispositivos de polo dominante, cuxo comportamento se pode describir mediante (Figura 2):

- Ganancia estática (A_o): ganancia a baixas frecuencias.
- Frecuencia superior (ω_o): limiar superior da ganancia estática.
- Ganancia de frecuencia unidade (Gain Bain Product: GBP): é a frecuencia á que a ganancia faise 1 (0 dB).

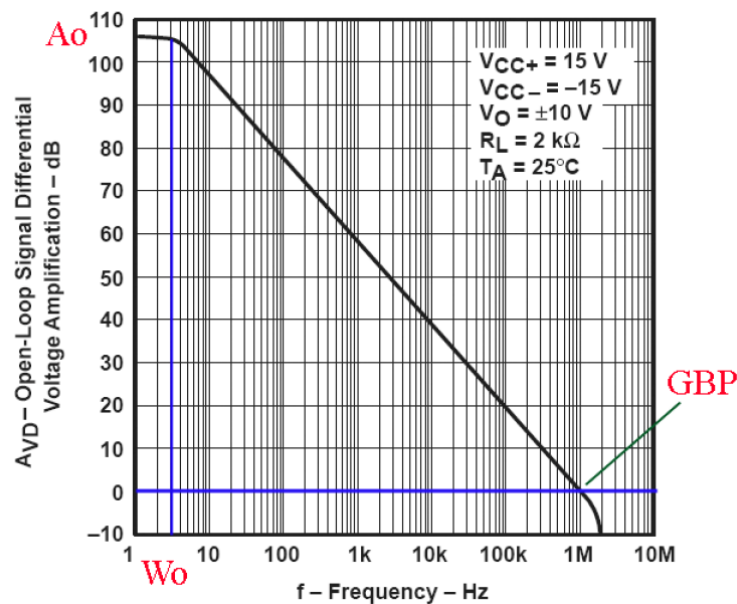


Figura 2: Curva de ganancia vs frecuencia.

Estas características son do AOP en lazo aberto, modificándose cando o amplificador está realimentado, excepto a frecuencia de ganancia unidade (GPB) é un invariante.

- **Impedancia de saída:** Se $Z_{out} \ll Z_{carga}$ podemos supoñer que a tensión de saída é independente da carga. Debe terse en conta que a rede de realimentación actúa como carga, sendo posible que en ocasións non se verifique a hipótese anterior, debéndose considerarse a intensidade e por tanto a Z_{carga} nas análises.
- **Offset de tensións:** aínda que idealmente se non hai tensión diferencial de entrada V_{DFF} debería haber tensión nula á saída. Isto non é así, debido fundamentalmente á tolerancias de fabricación e asimetrías no deseño. O fabricante da especificacións de como compensar este desvío.

Tal é como indicamos na Figura 1, supoñemos alimentación bipolar (split supply), aínda que na maior parte dos sistemas actuais trabállase con alimentación unipolar (single supply). Nesta caso, a tensión de saída do AOP varía entre 0 voltios e a tensión de alimentación.

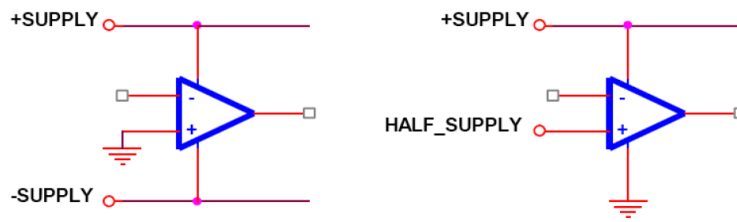


Figura 3: Alimentación bipolar e unipolar para un AOP.

Hai un gran número de AOP integrados dispoñibles para adaptarse a todas as posibles aplicacións, desde bipolar estándar, de precisión, de alta velocidade, de baixo ruído, de alta tensión, etc. Os AOP están dispoñibles en circuitos integrados con AOP simples, dobres ou cuádruples dentro dun único *chip*. O máis común e utilizado de todos os AOP é o estándar da industria $\mu A - 741$. Na Figura 4 móstrase a disposición do patillaxe deste integrado (fíxate na fenda do integrado para identificar a numeración dos pins, en caso de ausencia deste oco, a numeración identifícase cun círculo indicando o pin 1).

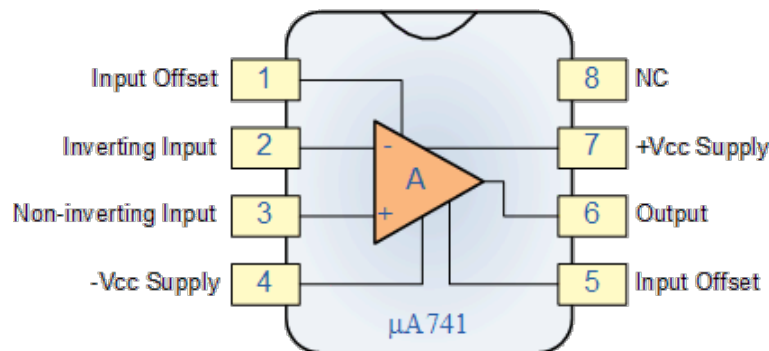


Figura 4: Esquema do circuito integrado $\mu A - 741$.

4.1. Amplificador operacional en lazo aberto

O AOP en lazo aberto funciona como un comparador de tensión que confronta un voltaxe analóxico con outro ou cunha tensión de referencia predeterminada, V_{REF} producindo unha saída en función desta comparación. Noutras palabras, o comparador de tensión verifica cal das dúas entradas é a maior.

Sabemos que o AOP estándar caracterízase pola súa alta ganancia en lazo aberto A_O e que a súa tensión de saída vén dada pola expresión: $V_{OUT} = A_O(V_+ - V_-)$ onde V_+ e V_- corresponden ás tensións nos terminais non inversor e inversor, respectivamente. Cando o AOP funciona en lazo aberto (ganancia moi alta ~ 120 dB) producirá unha saída entre estados saturados $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$ (valores da tensión de alimentación do AOP) segundo a sinal de entrada diferencial sexa positiva ou negativa. É, por tanto, un dispositivo biestable que podemos identificar como un conversor analóxico-dixital dun bit (a sinal de entrada é analóxica pero a saída se comporta dixitalmente). Na Figura 5 representamos este comportamento.

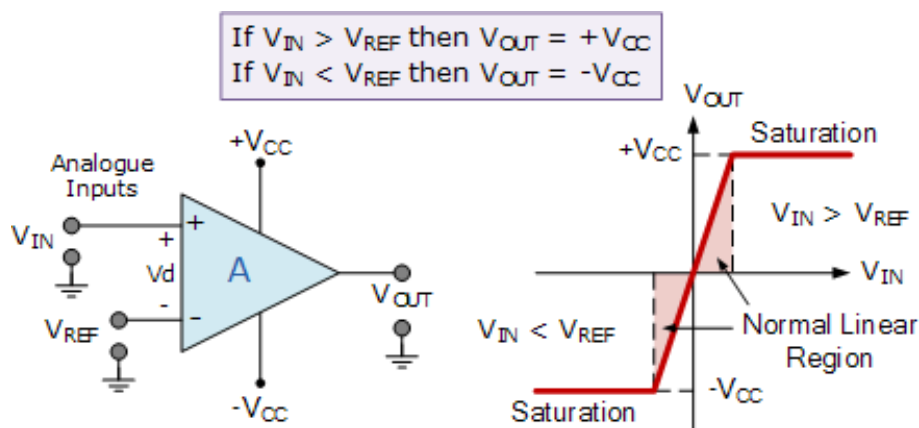


Figura 5: Curva de transferencia dun AOP real en lazo aberto.

Diciamos antes que o comparador de AOP básico produce unha saída de tensión positiva ou negativa (entre os valores de alimentación), comparando a súa tensión de entrada con algunha tensión de referencia de continua predeterminada. Hai moitas estratexias para conseguir esta tensión, as máis habituais (Figura 6) son empregar un divisor de tensión, unha batería, un díodo Zener ou potenciómetro (tensión variable).

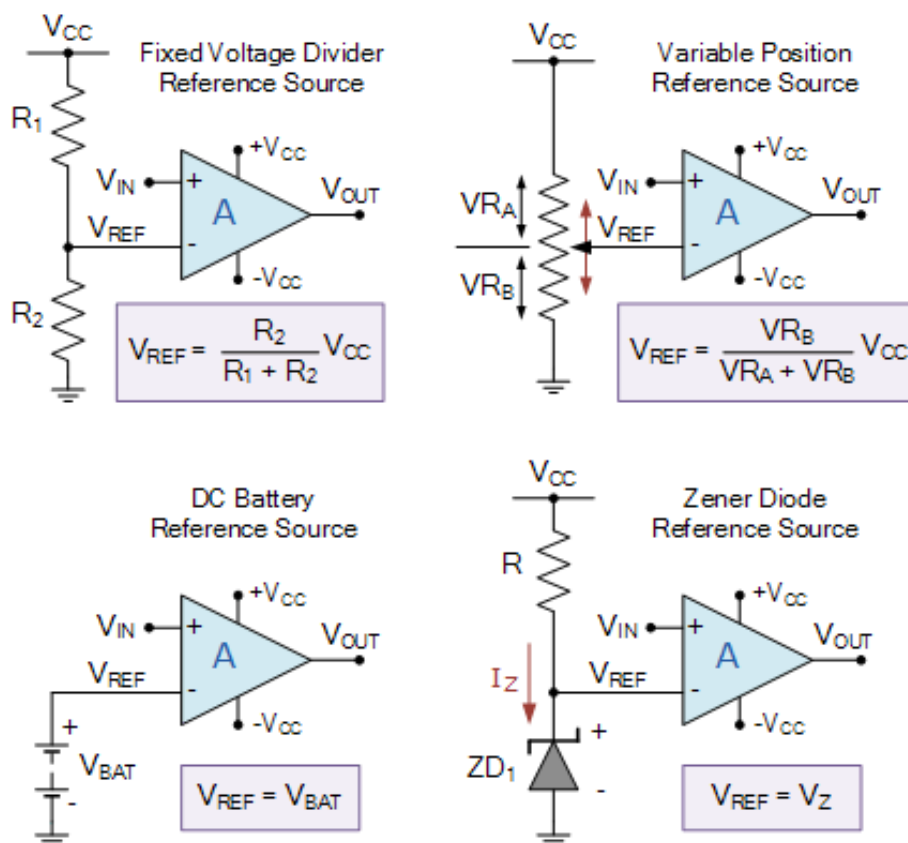


Figura 6: Formas de establecer unha tensión de referencia para un comparador.

4.2. Amplificador operacional en lazo pechado

Como sabemos, un AOP en lazo aberto ten unha ganancia moi elevada que ronda os 120 dB ou máis. Non obstante, esta ganancia tan elevada non é moi útil posto que converte

ao AOP nun dispositivo inestable e difícil de controlar, incluso para sinais diferenciais pequenas de entrada saturarían a saída perdendo o control do AOP (algúns micro-voltios serían suficientes para satura a saída).

Como a ganancia en lazo aberto é extremadamente alta, podemos permitírnos perder parte dela conectando a entrada inversora coa saída (realimentación negativa), a través dunha resistencia axeitada R_F , para reducir e controlar a ganancia total do AOP, facendo del unha configuración estable. Este *feedback* negativo dá como resultado que o terminal de entrada invertido teña unha tensión diferente á da sinal de entrada real, xa que será a suma da tensión de entrada máis a tensión de retroalimentación negativa. Polo tanto, debemos separar a sinal de entrada real da entrada invertida empregando unha resistencia de entrada R_{in} . A entrada positiva, está conectada a masa (tensión cero) como se mostra na Figura 7, pero o efecto deste circuío de retroalimentación en lazo pechado fai que o potencial de tensión na entrada de inversión sexa igual ao da entrada non inversora, producindo un punto de suma de *terra virtual*, posto que terá o mesmo potencial que a entrada conectada a masa. Noutras palabras, o AOP convértese nun *amplificador diferencial*.

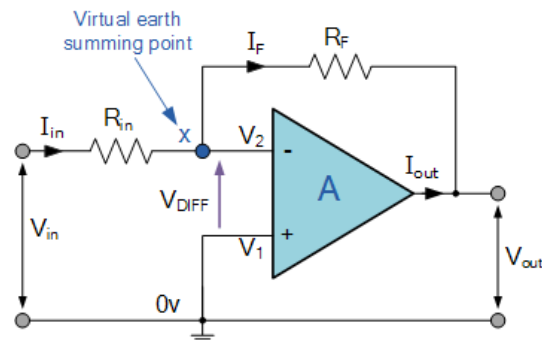


Figura 7: AOP en configuración de realimentación negativa.

O circuío da Figura 7, amplificador inversor, podemos analízalo coas regras de idealidade do AOP que lembramos a continuación:

- Non hai fluxos de corrente nos terminais de entrada.
- As dúas entradas do AOP son iguais ($V_1 = V_2$).

Non obstante, para os AOP reais ambas as dúas regras anteriores non se cumpren exactamente. Isto débese a que no punto de unión entre o sinal de entrada e a retroalimentación (denotado por X na Figura 7) ten o mesmo potencial que a entrada positiva (V_1) unida a masa ($V_1 = 0$), polo que temos un punto de terra virtual en X. Como consecuencia, a resistencia de entrada do amplificador é igual ao valor da resistencia de entrada, R_{in} e a ganancia en lazo pechado do amplificador inversor queda definido pola relación das dúas resistencias externas (R_{in} e R_F).

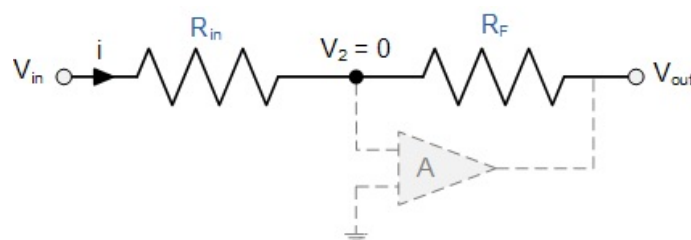


Figura 8: Circuío simplificado aplicando condicións de idealidade do AOP.

Dixemos anteriormente que hai dúas regras moi importantes que se verifican para un AOP e, en base a elas, imos a achar a ganancia do AOP retroalimentado negativamente da 7. Como non entra corrente ao AOP, se aplicamos a lei de nós de Kirchhoff ao punto X (Figura 8) temos que $I_{in} = I_F = i$:

$$i = \frac{V_{in} - V_2}{R_{in}} = \frac{V_2 - V_{out}}{R_F}. \quad (2)$$

Dado que $V_2 = V_1 = 0$ e reorganizando termos, obtemos que a ganancia para esta configuración inversora en lazo pechado do AOP é,

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_F}{R_{in}}. \quad (3)$$

5. Parte experimental

5.1. Proxecto 1: AOP en lazo aberto

Neste proxecto experimental estudaremos configuracións do amplificador operacional en lazo aberto. No último montaxe, empregaremos a placa Arduino Mega para simular o comportamento dos operacionais na circuitería externa.

1. Monta o circuito da Figura 9 na placa de inserción. Alimentaremolos unipolarmente entre $V_{cc} = 5\text{ V}$ e 0 V . Os valores das resistencias serán de $R = 1\text{ k}\Omega$.

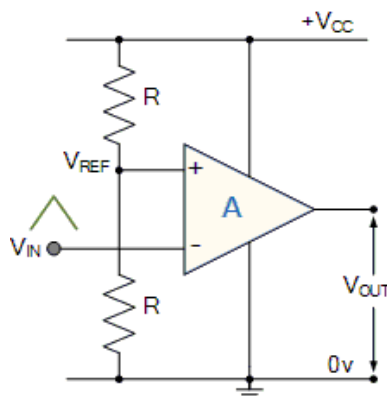


Figura 9: *Circuito con AOP en lazo aberto.*

- Introduce unha sinal de continua que varíe entre 0 V e 5 V , que iremos variando a incrementos de $\sim 0,3\text{ V}$ e medindo co polímetro os valores da tensión de entrada e saída.
 - Repite o procedemento anterior en orden inverso dende $(+5\text{ V e } 0\text{ V})$.
 - Cos valores do apartados anteriores, representa graficamente o comportamento do circuito visualizando a sinal de saída en ordenadas e a de entrada en abscisas. Á vista desta gráfica, explica o comportamento deste circuito.
 - Cales son os valores de saturación?
2. No circuito anterior, introduce unha sinal sinusoidal de amplitude máxima de 5 V e unha frecuencia de 1 kHz .

- Utiliza o osciloscopio para visualizar a sinal de entrada (CH1) e a de saída (CH2).
 - Sen cambiar a amplitude, investiga se o circuío se comporta igual para un rango de frecuencias amplo.
3. Emprega a placa Arduino subministrada e realiza unha montaxe exterior substituíndo o AOP pola placa para que reproduza o seu comportamento no circuío. Para a sinal V_{in} empregaremos a propia alimentación da placa (5 V de continua) en combinación cun potenciómetro (coas tres patillas funciona como partidor de tensión) para facer variable o voltaxe de entrada. Calcula o valor das resistencias para establecer unha tensión de referencia de 2,5 V a partir da alimentación da placa Arduino. Empregaremos díodos LED para visualizar o comportamento de saída (non te esquezas colocar unha resistencia limitante en serie cos díodos de $\sim 500 \Omega$). **Olo:** Á placa Arduino non pode ler valores de tensión superiores a 5 V. Utiliza a solución aportada na práctica de corrente continua para solucionar esta limitación. *Perigo de destrución da Arduino se salta este requisito!*

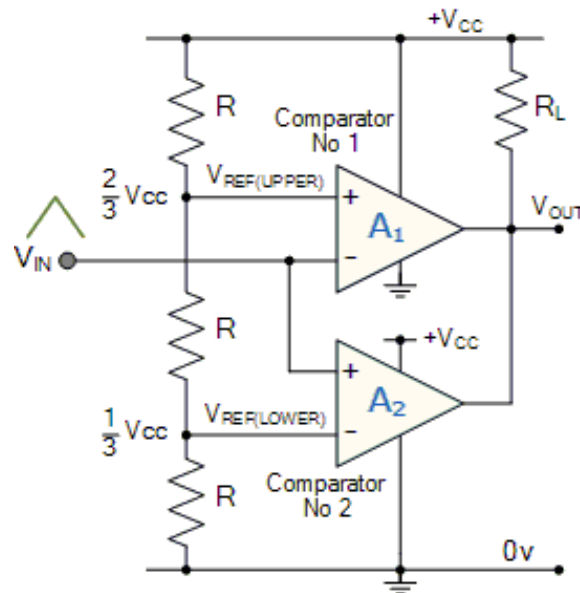


Figura 10: Comparador de ventá.

4. Repite o proceso anterior para o circuío da Figura 10.

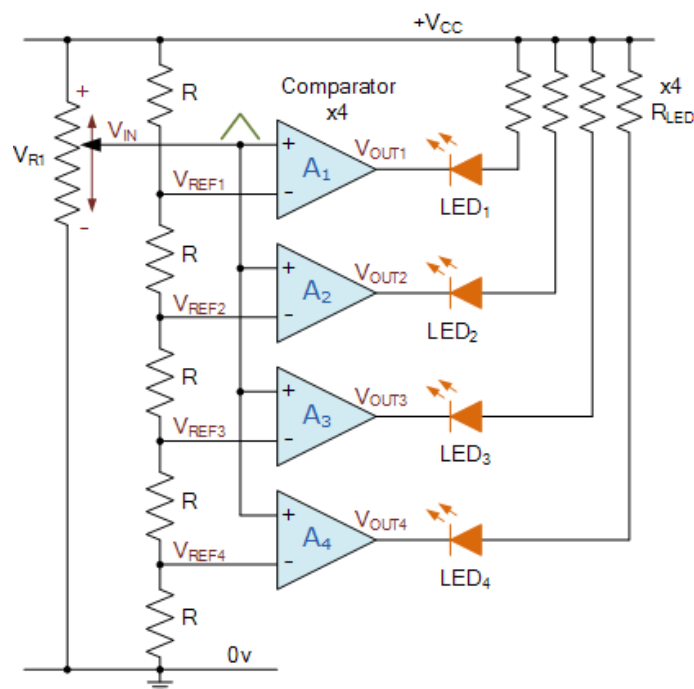


Figura 11: *Detector luminoso de nivel de voltaxe.*

5. Estudo dun detector luminoso de nivel de voltaxe con Arduino (Figura 11).

- Explica, coas túas verbas, cal é o comportamento do circuíto da Figura 11 en función dos valores da tensión de entrada, das tensións de referencia e dos díodos LED de saída.
- Realiza unha montaxe na placa de prototipado e coa placa Arduino simularemos o comportamento dos operacionais neste circuíto (supoñemos que os AOP estarían alimentados entre 0 – 5 V). A V_{cc} será a da placa (alimentación unipolar de 5 V), as resistencias do partidor de tensión serán todas iguais a $1\text{ k}\Omega$ e os díodos vermellos/verdes cunha resistencia limitante de 500Ω .

5.2. Proxecto 2: AOP en lazo pechado

Neste estudaremos varias configuracións simples de AOP en lazo pechado.

1. Monta o circuíto amplificador inversor da Figura 12 cunha ganancia de 10 (emprega resistencias do orden de $\text{k}\Omega$) e con alimentación bipolar entre $+10\text{ V}$ e -10 V .

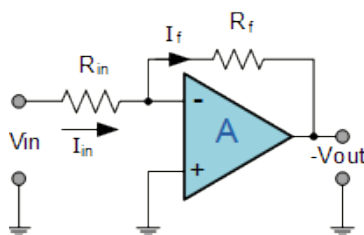


Figura 12: *AOP en configuración de amplificador inversor.*

- Introduce unha sinal de continua que varíe entre $+10\text{ V}$ e -10 V e mide co polímetro os valores da tensión de entrada e saída e calcula o valor teórico de saída para cada entrada.
 - Representa os valores anteriores tomando como eixe de ordenadas a tensión de saída e como abscisas a tensión de entrada. Que valor de tensión de entrada satura ao amplificador?
 - Determina, a partir desta gráfica, o valor da ganancia do circuío. Para iso, discute co teu compañeiro/a que estratexia adoptarías e solicítale a opinión do profesor antes de poñela en práctica.
 - Agora imos a empregar unha sinal de entrada alterna cun valor de pico-pico de $V_{in_{pp}} = 2\text{ V}$ e unha frecuencia de 1 kHz . Coloca as sondas do osciloscopio para que na canle 1 visualicemos V_{in} e na canle 2 a sinal de saída V_{out} . Cambia o modo de tempos a XY, que representa a gráfica que aparece na pantalla? Poderíamos medir a ganancia do circuío e os puntos de saturación?
2. Neste punto queremos determinar a curva de ganancia fronte a frecuencia do noso circuío. Procederemos do seguinte xeito:
- Empregaremos unha sinal de entrada alterna con frecuencia variable (xerador de funcións) e cun valor de pico-pico de $V_{in_{pp}} = 1\text{ V}$.
 - Colocamos as sondas do osciloscopio na entrada para medir V_{in} (CH1) e a sinal de saída V_{out} (CH2). Na pantalla medimos as amplitudes das sinais para poder achar a ganancia cando a frecuencia toma valores no rango $\in \{25, 100, 500, 1000, 5000, 10000, 30000, \dots\}\text{ Hz}$ ata acadar a frecuencia na que ganancia sexa igual a **1**. Asegúrate que non cambia a amplitude cando cambias a frecuencia. Se é así, reaxusta.
 - Representa os valores obtidos no punto anterior poñendo a ganancia en dB $20 \log(V_{out}/V_{in})$ no eixo de ordenadas e no de abscisas a frecuencia en Hz en escala logarítmica.
 - Cal é o ancho de banda deste circuío e o valor da frecuencia con ganancia unidade?
 - **Investigación voluntaria para nota:** Se na entrada non inversora é colgada dun partidor de tensión formado coas resistencias R_{in} e R_F , que efectos conseguiríamos?
3. Aquí imos a estudar unha nova configuración en lazo pechado que se amosa na Figura 13:

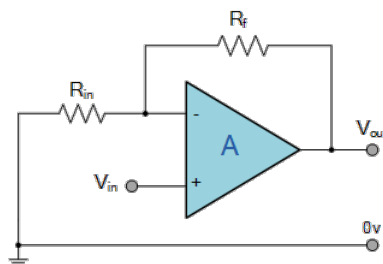


Figura 13: AOP en configuración de amplificador non-inversor.

- Deduce analiticamente que o valor da ganancia é igual a

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}. \quad (4)$$

- En que se diferencia este circuíto do anteriormente estudado?.
 - Monta o circuíto alimentado bipolarmente entre +10 V e −10 V cunha ganancia aproximadamente de 10 (emprega resistencias de kΩ).
 - Igual que no circuíto anterior, representa os valores da tensión de saída fronte aos de entrada e a curva de ganancia fronte a frecuencia.
4. Se as resistencias no circuíto da Figura 13 tomaran os valores de $R_f = 0$ (cortocircuíto) e $R_{in} \rightarrow \infty$ (circuíto aberto), o circuíto sería equivalente ao amosado na Figura 14.

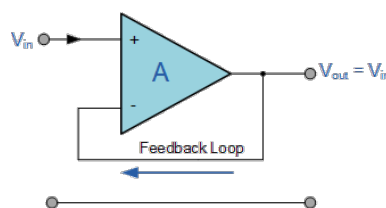


Figura 14: *Seguidor de tensión.*

- Deduce analiticamente a ganancia deste novo circuíto.
- Utiliza o osciloscopio para obter a ganancia do novo circuíto a partir da visualización da sinal de entrada (CH1) e da de saída (CH2). Varia a amplitude da sinal de entrada e comproba se cambia a amplitude de saída.
- Busca a frecuencia a partir da cal se producen distorsións na saída. Nota que se non hai distorsión, as ondas de entrada e de saída deben superpoñerse perfectamente na pantalla do osciloscopio (ganancia 1). Entón, a frecuencia máxima pode ser detectada realizando un varrido en frecuencia da sinal de entrada ata que a superposición das dúas sinais xa non sexa posible.
- **Investigación voluntaria para nota:** Cal cres que é a utilidade práctica deste circuíto e busca un exemplo demostrativo para este uso.

5.3. Proxecto 3: DAC con Arduino e AOP

Un DAC (Digital Analogic Converter) é un circuíto que permite converter sinais dixitais en analóxicas. As placas de Arduino teñen saídas analóxicas que permiten dispoñer de tensións de saída variables de 0 a 5V pero non son tensións analóxicas verdadeiras. Polo tanto, só hai dúas opcións: converter as saídas de Arduino en analóxicas verdadeiras con circuitería externa ou mercar unha placa Arduino Due (dispón de dúas saídas analóxicas auténticas e variables).

Con poucas compoñentes pódese construír un circuíto DAC que fará un bo traballo en aplicacións de baixa velocidade e de baixa precisión. Isto funcionará como DAC porque pode ter tensións de saída entre 0V e 5V só modificando unha variable no programa entre 0 e 255. Para construílo precisaremos:

- un AOP (se o operacional que usas non é rail-to-rail os resultados serán un pouco perores).

- Condensador de 22 μF
- Unha resistencia de 3,3 $\text{k}\Omega$.

5.3.1. Explicación do PWM e o Duty Cycle

As placas Arduino emprega a técnica coñecida como PWM (Pulse Width Modulation) para xerar unha sinal analóxica. O problema é que xera unha onda cadrada de valor medio (ciclo de traballo ou duty cycle) o indicado pola función *analogWrite()* (non é por tanto unha onda constante) pero que non axeitada para determinados propósitos que requiren unha función de continua verdadeira.

O ciclo de traballo (DC) é a relación entre o tempo ON e o período total da onda. O tempo ON é a cantidade de tempo en que a onda permanece a 5V e o período total é a suma do tempo mentres permanece entre 5V e 0V.

Cando empregamos a función *AnalogWrite()*, establécese o ciclo de traballo de saída que pode variar entre 0 % e 100 % segundo os valores que se lle pasan á función *AnalogWrite()* no rango entre (0 - 255). O valor do DC será (Figura 15):

$$DC = \frac{ON\ TIME}{(OFF\ TIME + ON\ TIME)} \quad (5)$$

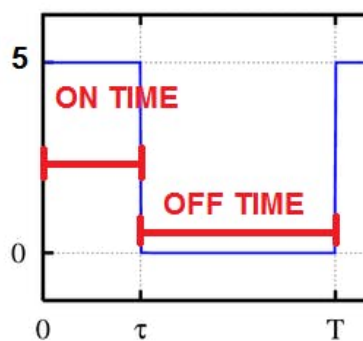


Figura 15: PWM e ciclo de traballo (Duty Cycle).

5.3.2. Ciclo traballo e valor medio

O valor medio dunha onda é a media da tensión proporcionada desde a saída nun período de tempo da onda. A forma de onda cadrada con amplitude 0 V – 5 V ten un valor medio que é igual á amplitude máxima (5 V) multiplicada polo ciclo de traballo (DC). Isto significa que podemos cambiar o valor medio da saída PWM mediante a función *analogWrite()*.

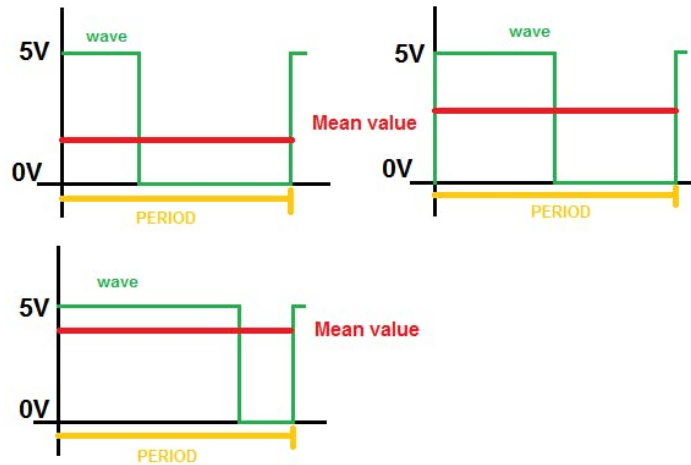


Figura 16: Valor medio do ciclo de traballo.

Por exemplo, se establece o ciclo de traballo no 0% (`analogWrite(pin,0)`) teremos un valor medio de 0 V e se o establecésemos no 50% (`analogWrite(pin,127)`) terá un valor medio de 2,5 V e de 5 V co 100%).

5.3.3. Valor medio e filtro

Agora que sabemos modificar o valor medio da onda, necesitamos algo que nos permita usalo. Matematicamente, cada sinal está formada pola suma de moitas sinais harmónicas (transformada de Fourier) que se diferencian entre si pola frecuencia e amplitude. O valor medio da onda é o valor do harmónico con frecuencia cero (compoñente de continua da sinal). Este valor é o que se precisa para ter unha saída de corrente continua desexada á saída do DAC. Podemos extraer o valor de continua da sinal empregando un filtro *paso baixo*, que permite o paso das frecuencias baixas da sinal (ou so o de frecuencia nula) e bloquea case todos os demais harmónicos (frecuencias altas). Non se pode obter un filtro de alta precisión coas compoñentes seleccionadas, pero é o suficientemente bo para aplicacións sinxelas.

5.3.4. Construír o circuítio cun filtro paso-baixa

Os filtros paso-baixa son usados para deixar pasar as frecuencias baixas e só permite o paso a frecuencias inferiores á frecuencia de corte do filtro (F_C) atenuando as demais. A montaxe que precisamos para construír un paso-baixo cun AOP é a que se amosa na Figura 17 e a frecuencia de corte ven dada por $F_C = 1/(6,28RC)$.

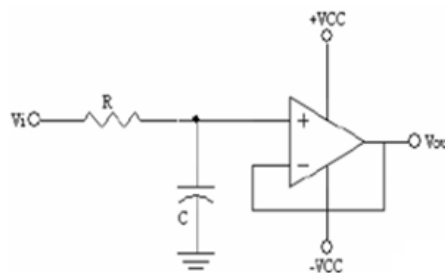


Figura 17: Esquema do filtro paso-baixa ($+V_{cc} = 5V$ e $-V_{cc} = 0V$).

Na Figura 18 presentamos a montaxe na placa de prototipado en combinación coa Arduino. A saída é o *fío laranxa* e proporcionará a saída de corrente continua que desexe.

5.3.5. Usando o circuío

Para empregar o circuío só tes que conectar a entrada dun pin dixital con PWM e usar a función *analogWrite()* no programa Arduino. O código que aparece a continuación emitirá unha onda cadrada do ciclo de traballo do 50 % no pin 5 (os pines con PWM dependen da Placa Arduino) e o DAC sairá ao redor de 2,5 V.

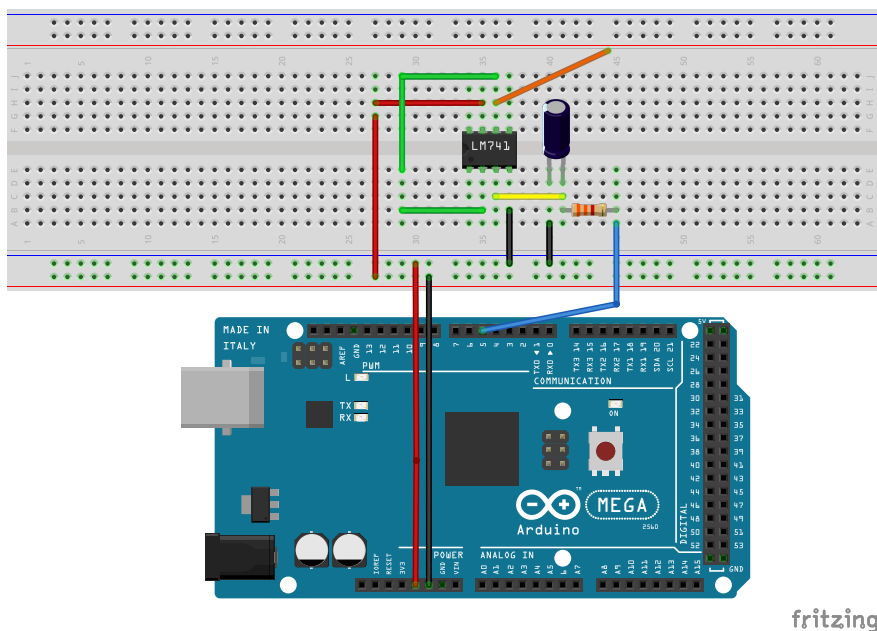


Figura 18: Montaxe do circuío con Arduino.

```

1 /*-----
2 Programa:    DAC
3 Descricion:  Valor continua dunha saida PWM
4 Hardware:    Arduino Mega con con filtro paso-baixa
5 Data:        24 Sept 2019
6 Autor:       Xose R. Fdez-Vidal
7 -----*/
8
9 void setup() {
10 // Inicializamos o pin 5 como saida.
11 pinMode(5, OUTPUT);
12 }
13
14
15 void loop() {
16 //asignamos o valor de PWM ao 50 % no pin 5
17 analogWrite(5,127);
18 }

```


Unha vez a montaxe experimental está funcionando, pídesse:

- Visualizar as sinais no osciloscopio (se aínda estás no laboratorio).
- Mediante un programa Python, visualiza dinamicamente os datos da entrada e de saída do DAC.
- **Axuda:** Nos apéndices atoparas unha versión dos programas necesarios para esta opción.

Referencias

- [1] Jesús Fraile-Mora, *Circuitos Eléctricos. (Capítulo 1)*. Ed. Pearson, 2012.
- [2] Wikipedia, *Amplificador operacional* — *Wikipedia, La enciclopedia libre*.
https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Amplificador_operacional, 2019.

A. Pautas experimentais a seguir

Para lograr a alimentación bipolar (simétrica) do AOP ($+V_{cc}$ e $-V_{cc}$), as fontes de alimentación de corrente continua deben operar en modo independente, coa configuración amosada na Figura 19 e seguir os seguintes pasos:

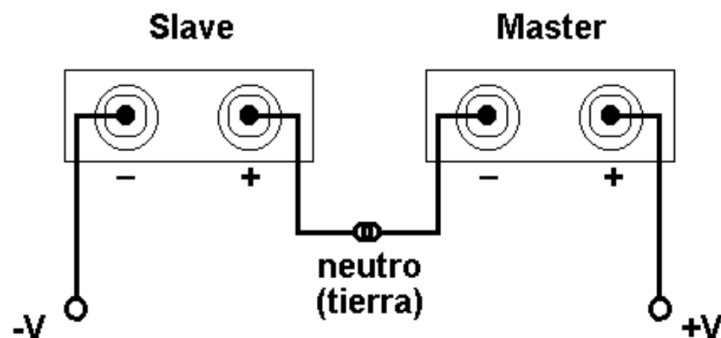


Figura 19: *Conexión da fonte de alimentación en modo bipolar.*

- Realizar a montaxe experimental coas fontes sen conectar.
- Comprobar que as conexións á masa coinciden nun punto común de unión: o neutro da fonte de alimentación (terra en estrela).
- É aconsellable non apagar a fonte, senón desconectar directamente os cables de conexión.
- Non excederse na lonxitude de cables e conectores (atención ao ruído).
- Á hora de conectar as fontes, a primeira de todas ha de ser a de alimentación $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$ do operacional. Non equivocar a polaridade!
- Conectar a tensión de entrada do operacional só despois de que este estea alimentado.
- Ao desconectar, seguir a orde inversa: primeiro quitar a tensión de entrada e despois a alimentación $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$, so pena de danar o operacional.

Estes circuítos resisten o mal uso, pero se cometemos algún dos erros enumerados a continuación, o circuíto integrado danarase irremediabilmente. Por favor, pon atención e evita o seguinte:

- Inverter a polaridade da alimentación.
- Superar as especificacións do dispositivo á hora de alimentalo (buscar en Internet as especificación se é preciso!).
- Deixar permanentemente conectada a tensión de entrada do AOP sen que estea conectado á alimentación.

B. Programa Arduino para enviar datos porto serie do DAC

```
1 /*-----
2 Programa:    DAC 2
3 Descricion:  Valor continua dunha saida PWM
4 Hardware:    Arduino Mega con con filtro paso-baixa
5 Data:        24 Sept 2019
6 Autor:       Xose R. Fdez-Vidal
7 -----*/
8 // seleccionar a entrada para o sensor analoxico (libre
   eleccion)
9 const int sensorPinS = A0;
10 const int sensorPinE = A1;
11
12 //seleccionar a entrada para pin PWM
13 const int pinPWM=5;
14
15 // variable que almacena el valor dixital (0 a 1023)
16 int sensorSaida, sensorEntrada;
17 // variable que almacena o voltaxe analoxico (0.0 a 5.0)
18 float value;
19
20 void setup() {
21
22 //Configuramos o Pin analoxico para ler a saida
23 pinMode(sensorPinS, INPUT);
24 pinMode(sensorPinE, INPUT);
25
26 // Inicializamos o pin dixital 5 como saida.
27 pinMode(pinPWM, OUTPUT);
28
29 //Establecemos a velocidade do porto serie en baudios
30 Serial.begin(9600);
31 }
32
33
34 void loop() {
35 //asignamos o valor de PWM ao 50 % no pin 5
36 analogWrite(pinPWM,127);
37
38 //Esperamos paso transitorios
39 delay(1);
40
41 // Lemos a saida do circuito e entrada
42 sensorSaida = analogRead(sensorPinS);
43 delay(1);
```

```

44 sensorEntrada = analogRead(sensorPinE);
45 delay(1);
46 // cambiar escala a 0.0 - 5.0 e o enviamos polo porto serie
47 value = fmap(sensorSaída, 0, 1023, 0.0, 5.0);
48 Serial.println(value);
49 delay(1);
50 value = fmap(sensorEntrada, 0, 1023, 0.0, 5.0);
51 Serial.println(value);
52 //Tomamos un dato cada 100ms
53 delay(10);
54 }
55
56
57 // cambio de escala entre floats
58 float fmap(float x, float in_min, float in_max, float out_min
    , float out_max) {
59 return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min)
    + out_min;
60 }

```

C. Programa Python que recolle datos porto serie e os representa dinamicamente

```

1  #!/~/.anaconda/bin/python python3
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3
4  """
5  @author: Xose R. Fedez-Vidal
6  Departamento de Fisica Aplicada.
7  EPSE. Campus de Lugo.
8  USC
9  """
10 # importamos a libreria para manexar o porto serie.
11 #Para instalar o paquete: conda install pyserial
12 import serial
13 # importamos numpy
14 import numpy
15 #importamos a libreria matplotlib
16 import matplotlib.pyplot as plt
17 # conda install pip; e logo instalamos o
18 #paquete drawnow como: pip install drawnow
19 from drawnow import *
20
21
22 #Dicimoslle a matplotlib que queremos un
23 #modo interactivo para representar datos dinamicamente

```

```

24 plt.ion()
25
26 #Criamos o noso obxecto serie chamado
27 #arduinoData y asinamos a velocidade
28  #(do entorno IDE de Arduino miramos cal
29  #e o porto asignado a placa)
30 #Depende do sistema operativo empregado.
31 #Windows denota os portos serie como COM1, COM2, etc.
32 arduinoData = serial.Serial('/dev/ttyACM0', 9600)
33
34
35 #Variables globais de entrada e saída
36 tempS= []
37 tempE= []
38 cnt=0
39
40 #Creamos unha funcion que represente os datos
41 def makeFig():
42     #Asinamos o maximos e minimos do eixe y
43     plt.ylim(0, 5)
44     #Ponhemos o titulo
45     plt.title('Sinais E/S do DAC')
46     #ponhemos un grid na grafica
47     plt.grid(True)
48     #ponhemos as lendas de cada eixo
49     plt.ylabel('Saída (V)')
50     #representamos a saída
51     plt.plot(tempS, 'ro-', label='Saída')
52     #asinamos o lugar para a lenda
53     plt.legend(loc='upper left')
54
55     #Creamos un segundo eixo y e o mesmo que arriba
56     plt2=plt.twinx()
57     plt2.ylim(0,5)
58     plt2.plot(tempE, 'b^-', label='Entrada')
59     plt2.set_ylabel('Entrada (V)')
60     plt2.ticklabel_format(useOffset=False)
61     plt2.legend(loc='upper right')
62
63
64 while True: # un bucle while infinito
65
66     #espera ata que haxa un dato no porto serie
67     while (arduinoData.inWaiting()==0):
68         pass #non faigas nada
69
70     #lemos unha linha dende o porto serie e a float
71     tmp = arduinoData.readline().decode('ascii')

```

```
72     temp = float(tmp)
73
74     #lemos unha linha dende o porto serie e a float
75     tmp2 = arduinoData.readline().decode('ascii')
76     temp2 = float(tmp2)
77
78     #Construimos o array engadindo E e S
79     tempS.append(temp)
80     tempE.append(temp2)
81
82     # chamamos a drawnow para actualizar a nosa grafica viva
83     drawnow(makeFig)
84
85     #Pausa breve. Importante para que drawnow tenha tempo
86     plt.pause(.00001)
87
88     #Se temos mais de 150 puntos, eliminamos o primeiro do array
89     # Deste xeito sempre veremos os ultimos 150 puntos na grafica.
90     cnt=cnt+1
91     if(cnt>150):
92         tempE.pop(0)
93         tempS.pop(0)
```