

RELOJ “AIRE”

Por Pedro Eisman Cabado, octubre 2025

- GUIA DE OPERACIÓN -



1. INTRODUCCIÓN

Apurando los últimos días que tengo de la licencia de Fusion 360, he elaborado un último reloj en este mes de octubre de 2025. Se trata de una versión del clásico “Hollow Clock”.

Este reloj típicamente se ha fabricado con PLA en impresora 3D pero yo lo he diseñado en madera de MDF y contrachapado de tilo para poder hacer las piezas con mi cortadora láser de diodo. El reloj funciona con motores 28BYJ-48 y con Arduino. Se caracteriza por su sencillez y porque sus manecillas parecen levitar, sin estar conectadas aparentemente a ningún sitio. Toda la estructura es totalmente hueca lo que le da una apariencia muy liviana y de ahí su nombre, Reloj “Aire”.



En mi versión de este reloj utilizo dos motores al igual que en las versiones de PLA, pero yo le he incorporado un segundero que utiliza una de las dos coronas como explico más adelante. Por eso he añadido un tren de engranajes “flotante” para dar las horas.

Este reloj no lleva RTC dado que incluir un punto de referencia como sería un sensor hall complicaría mucho el reloj y este perdería su sencillez. Así que la regulación se hace a través de “delays” en el código del Arduino, exactamente igual que en el reloj “Campanilla”.

2. EL CIRCUITO Y SU PROGRAMA

Al igual que en mis relojes anteriores el código de este reloj lo he elaborado con Chat GPT. El código en este caso es muy sencillo dado que el reloj no lleva ni interruptores ni RTC. Aunque los motores 28BYJ-48 no pueden replicarse en Wowki la comprobación del código ha sido relativamente sencilla, básicamente cargar versiones en el Arduino he ir probando las mismas.

Una cuestión de interés es que los motores se calientan bastante al estar girando permanentemente, en particular el segundero. Si bien esto es normal en este tipo de motores paso a paso, me ha parecido pertinente intentar mitigarlo en la medida de lo posible. Así que he probado varias versiones que desenergizaban temporalmente las bobinas, pero lamentablemente estos micro cortes provocaban fallos de torque o vibraciones por lo que al final he decidido ignorar el asunto. En el reloj “Campanilla” ocurre lo mismo y ese reloj lleva funcionando en continuo desde hace más de tres años. Así que el calentamiento no debería suponer un gran problema.

El reloj como explico más adelante lleva dos “trenes” de engranajes, uno para el segundero y otro para los minutos/horas. El ajuste fino en los bucles del código se consigue con “microdelays”. Solo hace falta paciencia e ir midiendo tiempos para obtener diferencias pequeñas, de unos pocos segundos al trimestre.

Muestro un ejemplo de las mediciones efectuadas:

MINUTOS MEDIDOS	VUELTAS	RETRASO EN SEGUNDOS	TOTAL SEGUNDOS MEDIDOS	% RETRASO	DELAY MICRO
760	95	13.5	45600	99.97039474	234306
768	96	13.7	46080	99.9702691	234305
776	97	13.7	46560	99.9705756	234306

El código completo como se puede observar es muy escueto:

```
// --- Pines segundero ---
#define S_IN1 11
#define S_IN2 10
#define S_IN3 9
#define S_IN4 8

// --- Pines minuterio ---
#define M_IN1 4
#define M_IN2 5
#define M_IN3 6
#define M_IN4 7

// --- Secuencia de pasos (wave drive) ---
int paso[4][4] = {
  {0,0,0,1},
  {0,0,1,0},
  {0,1,0,0},
  {1,0,0,0}
};

// --- Índices ---
int sIndice = 0;
int mIndice = 0;

// --- Temporización ---
unsigned long sUltimo = 0;
unsigned long mUltimo = 0;

// --- Delays en microsegundos ---
unsigned long sDelay = 3901; // Segundero, ajustable decorativo
unsigned long mDelay = 234306; // Minuterio, calculado para 60 min por vuelta DESPUES DE 13 HORAS DE CONTROL (VER EXCEL)

void setup() {
  pinMode(S_IN1, OUTPUT); pinMode(S_IN2, OUTPUT);
  pinMode(S_IN3, OUTPUT); pinMode(S_IN4, OUTPUT);

  pinMode(M_IN1, OUTPUT); pinMode(M_IN2, OUTPUT);
  pinMode(M_IN3, OUTPUT); pinMode(M_IN4, OUTPUT);
}

void loop() {
  unsigned long now = micros();

  // --- SEGUNDERO ---
  if (now - sUltimo >= sDelay) {
    digitalWrite(S_IN1, paso[sIndice][0]);
    digitalWrite(S_IN2, paso[sIndice][1]);
    digitalWrite(S_IN3, paso[sIndice][2]);
    digitalWrite(S_IN4, paso[sIndice][3]);
    sIndice = (sIndice + 1) % 4;
    sUltimo = now;
  }

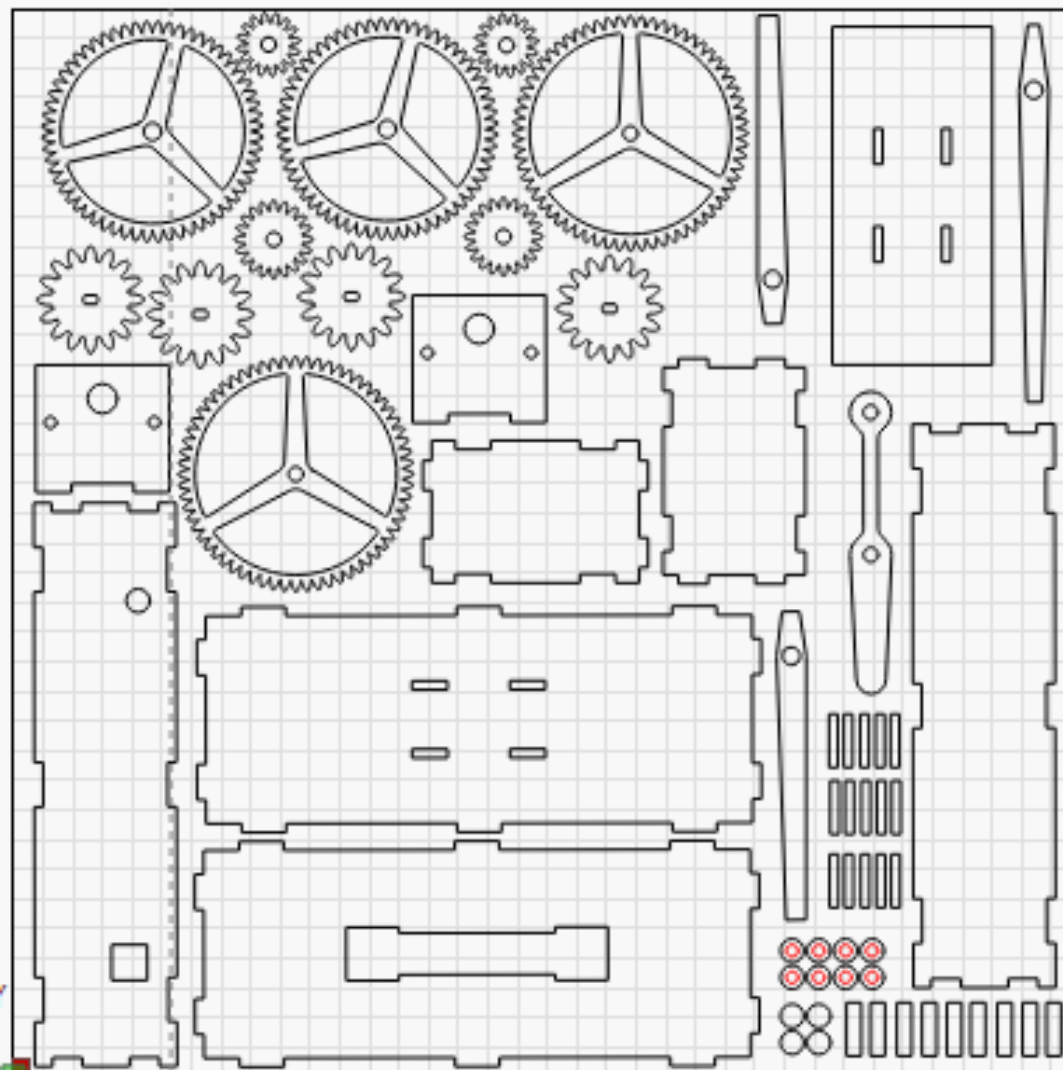
  // --- MINUTERO ---
  if (now - mUltimo >= mDelay) {
    digitalWrite(M_IN1, paso[mIndice][0]);
    digitalWrite(M_IN2, paso[mIndice][1]);
    digitalWrite(M_IN3, paso[mIndice][2]);
    digitalWrite(M_IN4, paso[mIndice][3]);
    mIndice = (mIndice + 1) % 4;
    mUltimo = now;
  }
}
```

3. MATERIALES Y ESTRUCTURA

Para la elaboración del reloj se han utilizado los siguientes materiales:

- Planchas de MDF y de tilo de 3 mm de espesor
- Placa de Arduino Uno R3
- 2 motores 28BYJ-48 con sus drivers ULN2003
- Tubos de latón de 4, 5 y 6 mm de diámetro
- Varilla de latón de 2 mm de diámetro
- Plancha de poliestireno de 0.5 mm de espesor
- Imanes de neodimio de diferentes tamaños
- Pletina adhesiva de plomo
- Fuente de alimentación de 9v
- Conector Jack hembra para fuente de alimentación
- Jumpers y cables varios
- Tintes al agua, tapa poros, barniz mate en espray y fieltros protectores
- Grafito en polvo

Para albergar al Arduino, a los motores y a sus drivers se ha diseñado una caja con un tamaño suficiente sobre la que se apoya el dial y las coronas principales. El tamaño de esta caja es el que determina realmente las dimensiones finales del reloj, que son aproximadamente de 29cm*25cm*8cm.



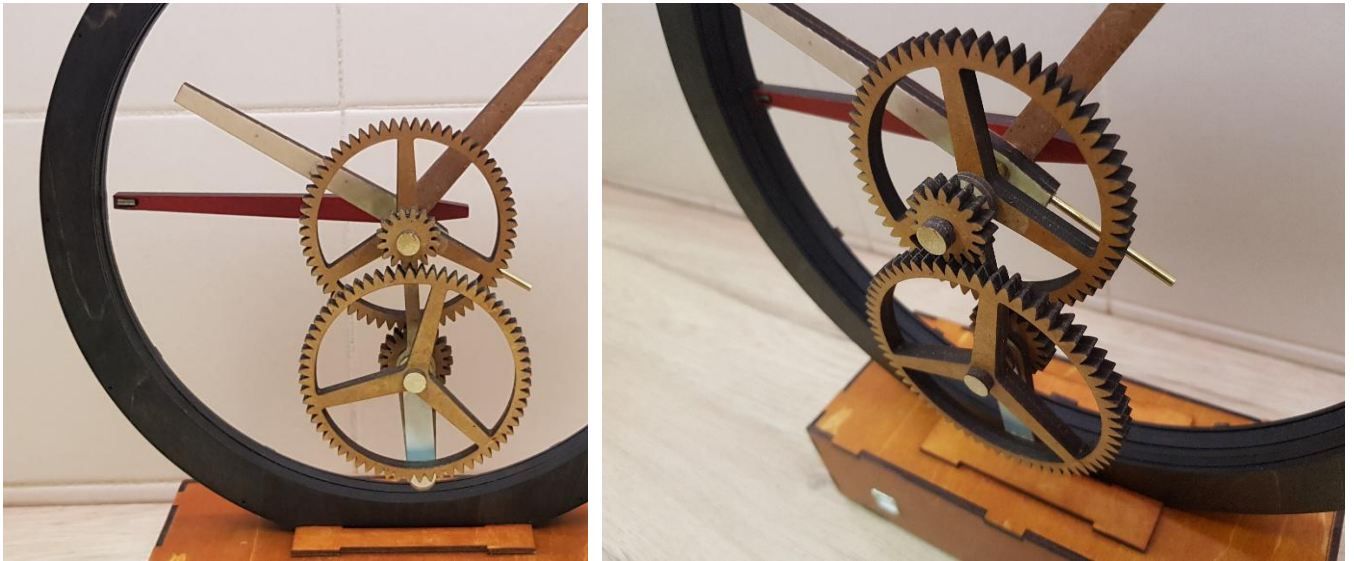
El reloj lleva dos coronas de 120 dientes ocultas en el dial, cada una de las cuales conecta con un piñón de 16 dientes ubicado en el extremo de los motores 28BYJ-48. Una de las coronas mueve el segundero y la otra el minuterero y esta última a su vez conecta con el tren de engranajes de la manecilla de la hora. Ambas coronas son totalmente independientes, básicamente la del segundero es puramente estética mientras que la del minuto/hora es la realmente importante. En cualquier caso, ambos grupos de engranajes/motores están calibrados para dar la mayor precisión posible.

La principal dificultad a tener en cuenta, en este caso mecánica, es el hecho de que las dos coronas giran una sobre la otra en el interior del dial. Esto provoca mucho rozamiento entre ambas por lo que es necesario mitigarlo para no exigir demasiado a los motores que ya de por sí se calientan bastante. Es por ello por lo que he cortado círculos de poliestireno con un sacabocados y los he pegado sobre las caras de las coronas para minimizar los puntos de contacto entre ellas y también con el dial. Además, he espolvoreado las zonas con grafito en polvo para reducir la fricción en la medida de lo posible. El resultado es muy bueno, las coronas giran suavemente.



Las coronas tienen muy poca tolerancia dentro del dial como se aprecia en la foto. Esto es para que no existan holguras y para que al apoyarlas sobre la caja engranen bien con los motores, sin vibraciones ni que tampoco se note mucho que giran y mantener de esta forma la “magia” del funcionamiento del reloj.

La manecilla del minuterio es solidaria a la corona tal como se muestra en la fotografía anterior. Sin embargo, la manecilla del segundero está alejada unos milímetros de la corona lo que la hace que parezca que levita o que esté unida por unos hilos invisibles. En realidad, interactúa con la corona gracias a unos imanes de neodimio que llevan tanto la manecilla como la corona.



De la manecilla del minuterio cuelga un tren completo de engranajes que conecta con la manecilla de la hora. Este tren lleva sus piñones de 16 y 20 dientes y sus coronas de 60 y 64 dientes. Todo el conjunto suspendido en el aire y solo conectado por un tubo de latón de 4 mm de diámetro con al minuterio. De hecho, he tenido que incluir una pletina de plomo adhesiva al conector intermedio del tren para que esté siempre en posición vertical y no oscile mucho. También he tenido que balancear un poco la aguja de la hora colocando una varilla de latón en uno de sus extremos para mantener al tren de engranajes lo más inmóvil posible.

Las maderas las he tintado para destacar los diferentes elementos y sobre todo para que se visualice bien la hora.

La tapa no va fijada a la caja, solo va apoyada. De esta forma esta se puede levantar y poner el reloj en hora girando las coronas con el dedo.

Muestro una fotografía del interior de la caja donde se aprecia la ubicación de los motores, de los drivers y del Arduino.

