



Zientzia eta Teknologiako fakultatea

RTD Diseinu Proiektua

Tresneria I

Maider Trebiño eta Saioa Iñiguez de Onsoño
2025eko Martxoa

Gaien Aurkibidea

1	Helburua	2
2	Prototipoaren zehaztapenak	2
3	Zirkuituaren diseinua	2
3.1	Zirkuituaren analisisa	2
3.2	Zirkuituaren implementazioa PSpicen	5
3.2.1	Diseinuaren baieztapena	5
3.2.2	Neurketa tartearen mugak	7
3.2.3	Sentsibilitate aldaketaren behaketa	8
3.3	Diseinuaren egokitzea laborategiko elementuei eta tolerantzien eragina	9
3.3.1	Laborategiko elementuei egokitzapena	9
3.3.2	Tolerantziaren eragina (Montecarlo)	10
4	Ondorioak	11

1 Helburua

Tenperatura sentsoze bezala platinozko RTDa duen zirkuitu transduktore zubidun anplifikadore eta OPAMP hirukoitzeko instrumentazio anplifikadorea erabiliz, tenperatura sentsoze propioa diseinatuko dugu. Horretarako, ezarritako eskakizunei erantzuteko proposamen zehatza emango dugu, eta PSpice programaren bidez kalkulu hau egiaztatuko dugu.

2 Prototipoaren zehaztapenak

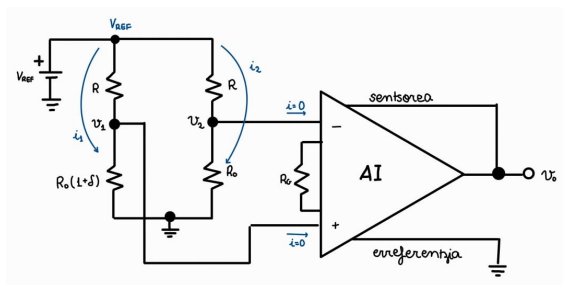
Zirkuitua RTD bat duen Wheatstone zubi batez eta OPAMP hirukoitzeko Instrumentazio Anplifikadore batez osatuta egongo da, eta hurrengo baldintzak bete behar ditu:

- Zirkuituaren sentsibilitatea: $0.2 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$
- Neurketa tartea: $[0^{\circ}\text{C}, 50^{\circ}\text{C}]$;
- Sentsorea: Platinozko RTDa, $R_0 = 100\Omega$, $\alpha = 0.00392/^{\circ}\text{C}$
- Sentsorearen autoberokuntza ekiditeko potentzia mugapena: RTDan xahuturiko potentzia 0.25mW gehienez ere.
- Elikadura iturriak: $\pm 15\text{V}$
- Instrumentazio anplifikadorearen datuak: $R_1 = 20\text{k}\Omega$, $R_2 = 200\text{k}\Omega$, $R_3 = 50\text{k}\Omega$

3 Zirkuituaren diseinua

Gure zirkuituak (1) tenperaturak erresistentzian eragindako aldaketa neurtzea nahi dugu. Horretarako, 2 irudiko zuba erabiliko dugu, erresistentziaren aldaketaren balioarekiko proportzionala den tentsio oso txiki bat sortzen duena. Bukatzeko, anplifikadore instrumentazionalak seinale hori anplifikatuko du, zarata baztertuz, tentsio hori neurgarria izan ahal izateko.

Horrela, zubiko hiru erresistentzia ezagunak izango ditugu, eta tenperaturarekin aldatuko dena, laugarrena, ezezaguna izango dugu. Zuba orekatzeko, hau da, potentzial diferentzia nulua izateko, zubiaren beso baten erresistentzia aldatuko dugu. Hortik aurrera, tenperaturak erresistentziaren balioan eragindako aldaketengatik, zuba desorekatuko da, eta tentsio aldaketa neurtu ahal izango dugu.



Irudia 1: RTD zirkuitua

3.1 Zirkuituaren analisisia

Zirkuitu hontan platinozko RTD bat erabiliko dugu, Pt100 motatakoa, hau da, tenperatura 0°C -koa denean 100Ω -ko balio nominala hartzen du. Erresistentzia hau, linealki aldatzen da tenperatura-erikiko, hau da, geroz eta tenperatura altuagoa izan, erresistentzia handiagoa izango da:

$$R_T = R_0(1 + \delta)$$

non $\delta = \alpha \Delta T$ den. Pt100 kasuko RTD-an, $\alpha = 3.92 \cdot 10^{-3} ^\circ C$ da, beraz, gure kasuan limite maximoa, $R_{T(max)}(50^\circ C) = 119.5\Omega$ izango dugu.

Alde batetik, RTDan disipatutako potentziak eragindako autoberokuntzak erresistentziaren balioan aldakuntzak eragiten ditu eta temperatura neurketetan erroreak eragin ditzake. Horregatik, zirkuitutik pasatzen den korronea kontrolatu behar da, eta intentsitatea txikituz efektu hori murriztu dezakegu.

$$P_{RT} < \frac{V^2}{R_T} = i_{2(max)}^2 \cdot R_{T(max)}$$

Temperatura altuenean($50^\circ C$), RTDren erresistentzia handiena izango da:

$$R_{T(max)} = R_0 \cdot (1 + \delta) = 119.5\Omega$$

Baldintza hau betetzeko:

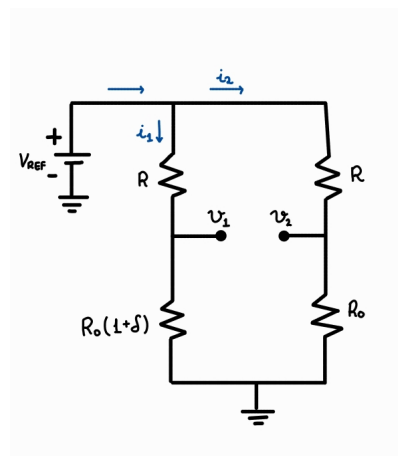
$$0.25 \cdot 10^{-3} W = i_{2(max)}^2 \cdot 119.5\Omega \rightarrow i_{2(max)} = 1.446 mA$$

Horren ondorioz, korronea ezin da hori baino handiagoa izan.

Konprobatzeko:

- **1.45mA**-rekin potentzia **0.2541mW** da \rightarrow gehiegi
- **1.44mA**-rekin potentzia **0.247mW** da \rightarrow egokia

Horregatik, 1.44mA erabiltzen da diseinuan.



Irudia 2: Wheatstone zubia

Korronea kontrolatzeko, erresistentzia osagarria (R) kalkulatzeko, honako formularekin:

$$R = \frac{V_{Ref}}{i_2} - R_0(1 + \delta)$$

($V_{Ref} = 15V$) Lan egiten ari garen temperatura tartea kontuan hartuz, R hurrengo baloreen artean oszilatuko du:

$$T = 50^\circ C \rightarrow R_T = 119.5\Omega \rightarrow R \approx 10297\Omega$$

$$T = 0^\circ C \rightarrow R_T = 100\Omega \rightarrow R \approx 10317\Omega$$

Hala ere, erresistentziaren balioa handiagoa hartuko dugu, $R = 10.5k\Omega$, RTD-tik doan intentsitateak autoberokuntza ez sortzeko.

Beste alde batetik, zirkuitua ebatziz, ondoko irteerako tentsioa lortzen da, hurbilketa linealik gabe:

$$V_o = \frac{A_{IA} V_{REF} \delta}{1 + \frac{R}{R_0} + (1 + \frac{R_0}{R})(1 + \delta)} \quad (1)$$

non A_{IA} instrumentazio anplifikadorearen irabazia da, hurrengoa betetzen duena:

$$A_{IA} = (1 + \frac{2R_3}{R_G}) \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

Hala ere, $\delta \ll 1$ dela asumituz, hurrengo adierazpen lineala lortzen dugu irteerako tentsioarako:

$$V_o \approx \frac{A_{IA} V_{REF} \delta}{2 + \frac{R}{R_0} + \frac{R_0}{R}} \quad (3)$$

Jarraian, sentsibilitatearen bidez V_{out} lortuko dugu gero 3 adierazpen lineala erabiliz, instrumentazio anplifikadorearen irabazia kalkulatzeko:

$$s = \frac{V_o}{\Delta T} \quad (4)$$

$$V_o = s \Delta T = 0.2 \frac{V}{^\circ C} \cdot 50^\circ C = 10V$$

Anplifikadorearen irabazia ondokoa dugu:

$$A_{IA} = 363,978$$

Behin kalkulu hauek egin ditugula, 2 ekuazioa erabiliz, potentziometroaren balioa kalkulatu dezakegu:

$$R_G = \frac{2 \cdot R_3}{A_{IA} \cdot \frac{R_1}{R_2} - 1} = 2.825k\Omega$$

Behin zirkuitua osatzeko datu guztiak estimatu ditugula, adierazpen linearen erabilpenagatik errore teorikoa estimatu dezakegu. Beraz, irteerako tentsioaren goiko limitea kalkulatu dezakegu [3] erabiliz, eta ondoko balorea lortzen dugu:

$$V_{o(lineala)} = 9.9999 \approx 10$$

Eta [1] adierazpen ez lineala erabiliz:

$$V_{o(EzLineala)} = 9.981$$

Beraz, errorea hurrengoa da:

$$\Delta V_{out} \approx 0.0184 \quad (5)$$

Errore lineala tenperatura unitateetan adierazi daiteke sentsibilitatea ezaguna bada. Beraz,

$$\Delta T = \frac{\Delta V}{s} \approx 0.0922^\circ C$$

Jarraitzeko, zirkuitua asetzen den muga behatuko dugu neurketa tartearen mugak aztertzeko. Gure seinalea anplifikadorea elikatuta dagoen balorera hurbiltzen denean, asetuko da, kasu honetan 15V-etara. Hori dela eta, irteerako seinalea 15V denean, RTDaren tenperatura lortu behar dugu. Erlazio lineala daukaguz, hiruko erregela bat zuzenean erabiliz erraz atera dezakegu tenperaturaren balioa:

$$\begin{cases} \Delta T = 50^{\circ}C \rightarrow V_0 = 10V \\ \Delta T_{sat} \rightarrow V_0 = 15V \end{cases}$$

Beraz, $\Delta T_{sat} = 75^{\circ}C$. Hau da, gure zirkuitua ezin izango du $75^{\circ}C$ baino gehiagoko tenperaturik neurtu.

Aipatzekoa da ere, diseinatutako zirkuituaren sentsibilitatea $0.2 V/^{\circ}C$ dela, eta balio hau hainbat modutan alda daitekeela:

Lehenik eta behin, instrumentazio anplifikadorearen irabazia (A_{IA}) aldatuz, sentsibilitatea handitu edo txikitu daiteke. Irabazia aldatuz irteerako tentsioa aldatzen delako eta ondorioz sentsibilitatea 1 eta 4 ekuazioetan ikusi daitekeen moduan. Beraz 2 ekuazioa erreparatuz, R_G txikiagoa aukeratuz edo R_2 handiagoa eginez, irabazia eta, ondorioz sentsibilitatea handitu egingo dira. Alderantziz, R_G handituz edo R_2 txikituz, sentsibilitatea murriztu egingo da.

Bigarrenik, Wheatstone zubiaren konfigurazioa aldatzeak ere eragina izan dezake: Erreferentzia tentsioa (V_{ref}) handituz, irteerako tentsioa handiagoa izango da (1), eta horrek sentsibilitatea areagotu dezake: Era berean, zubiaren erresistentzien balioak egokituz, tentsioaren aldaketa maximizatu edo minimizatu daiteke.

Azkenik, RTD sentsorearen ezaugarriek eragina dute. Platinozko RTDaren a konstantea handiagoa balitz, erresistentziaren aldaketa azkarragoa izango litzateke tenperaturarekiko, eta sentsibilitatea handiagoa izango litzateke.

Aldaketa hauek PSpice bidez simulatu eta ebaluatu daitezke (hurrengo atalean), sentsibilitatearen aldaketa nola eragiten duen ikusteko. Hala ere, kontuan hartu behar da gehiegizko sentsibilitate batek OPAMParen saturazioa azkartu dezakeela, irteerako tentsioaren distortsioa eraginez.

3.2 Zirkuituaren implementazioa PSpicen

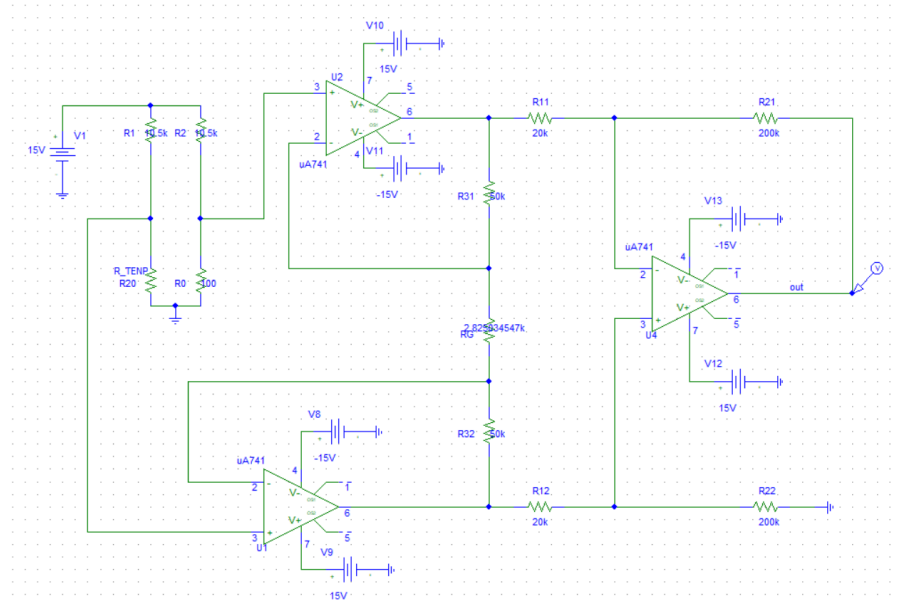
3.2.1 Diseinuaren baieztapena

Hurrengo atal honetan, PSpice programa erabiliz, aurretik kalkulatu ditugun osagaiak erabiliz zirkuitua eraikiko dugu (3). Honetan, Wheatstone zubia eta instrumentazio anplifikadorearen adierazpena ikusi daiteke.

Tenperatura sentsore bezala erabiliko dugun RTDaren tenperatura nominala 0 izanik, eta $[0^{\circ}C, 50^{\circ}C]$ tarteko tenperaturaren aldaketaren arabera irteerako tentsioa neurtzeko, tentsio neurgailua instrumentazio anplifikadorearen irteeran ezarri dugu, 3 irudian ikusi daitekeen bezala.

Simulazioan, 4.en irudian aurretiko kalkuluekin suposatu dugun emaitzara heldu garelara ikusi daiteke, $T = 50^{\circ}C$ ditugunean $V_0 \approx 10V$ koa baita.

Autoberokuntza faktoreagatik, zirkuituko osagaien ezegokitasunagatik edo/eta lehenengo atalean egingako hurbilketa lineala guztiz egokia ez izateagatik, izan daitezke $V_0 = 10V$ zehazki ez izatea, gure kasuan $V_0 = 9.978V$ baita. Errorea beraz, $\Delta V = 0.022V$ -koa dugu.

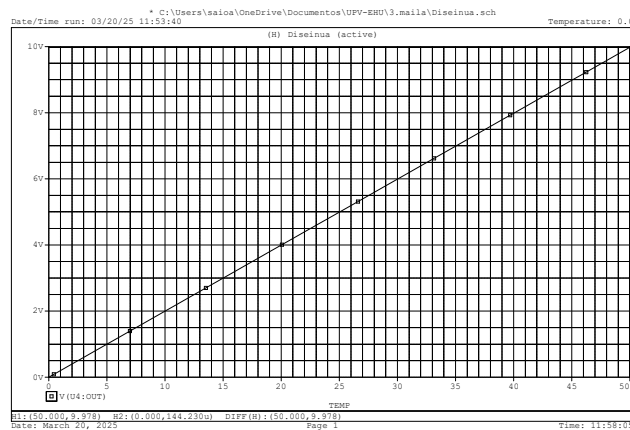


Irudia 3: RTD zirkuitua

Hala ere, eskakizunak betetzen dituela ere ikusi dezakegu, 4 zuzenaren malda sentsibilitatea dugu-lako:

$$s = \frac{V_0}{\Delta T} \approx \frac{10V}{50^\circ C} \approx 0.2V/^\circ C$$

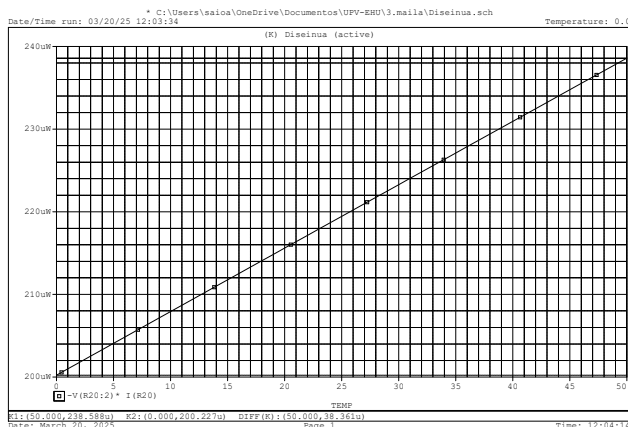
Zehazki, lortutako sentsibilitatea hurrengoa da: $s = 0.1995V/^\circ C$. Beraz, malda errorea $\Delta s = 0.0005V/^\circ C$ -koa da. Datu hauekin, errore lineala temperatura unitateetan hurrengoa da: $\Delta T = 0.1102^\circ C$



Irudia 4: V-T grafikoa

Hasieran zehazten zen bezala, bete beharreko beste eskakizun bat RTDan disipatutako potentziak $0.25mW$ ko balioa baino ezin duela gainditu da. Hala, zubi transduktoretik dabilen korrontearen intentsitatea jakinda, horren irteeran disipatutako potentzia kalkulatu dugu.

Horretarako, tentsio neurgailua zubiaren irteeran kokatuko dugu, eta potentzia tenperaturarekiko simulazioa lortuko dugu, 5 irudian ikusi daitekeen bezala.



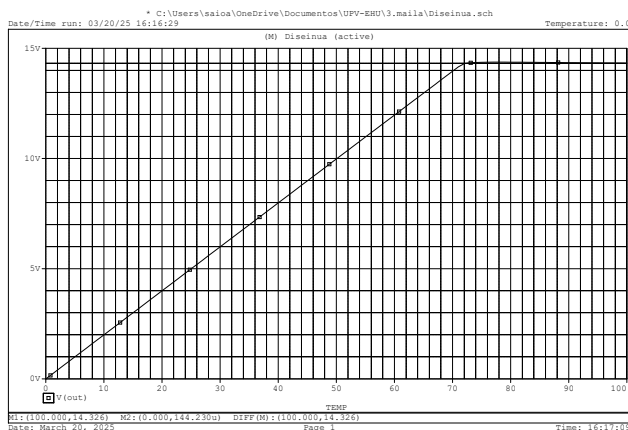
Irudia 5: P-T grafikoa

Grafikora begira konprobatu dezakegu gure diseinuak ez duela potentzia hori gainditzen, $T = 50^{\circ}\text{C}$ denean $P = 0.238\text{mW}$ delako, eta beraz autoberokuntza saihesten dugula.

3.2.2 Neurketa tartearen mugak

Atal honen helburua da zirkuituak bere irteeran lortu dezakeen tentsio maximoa identifikatzea. Hau da, OPAMP amplifikadorea asetasun puntura zer tenperaturan iristen den aztertzea.

Horretarako, PSpice-en simulazio bat burutu dugu tenperatura-tartea zabalduta, hasierako $[0^{\circ}\text{C}, 50^{\circ}\text{C}]$ tarte estandarra $[0^{\circ}\text{C}, 100^{\circ}\text{C}]$ -ra luzatuz. Simulazioan, tenperatura igo ahala irteerako tentsioa (V_{out}) nola aldatzen den eta zein puntutan hasten den zirkuitua saturatzen aztertu dugu.



Irudia 6: asetuta

Grafikoan ikus daitekeen bezala, irteerako tentsioa modu ia linealean igotzen da tenperaturarekin batera, baina 75°C inguruan 14.3V inguruko baliora iristen da, eta hortik aurrera ez da ia gehiago igotzen. Honek adierazten du zirkuitua asetzen dela, hau da, OPAMP-ak ezin duela bere elikadura iturria ($\pm 15\text{V}$) gainditu eta bere funtzionamendu lineala galdu egiten duela.

Balio hori bat dator aurreko 3.1 atalean kalkulatu dugunarekin, non formula linealak erabiliz $\Delta T_{sat} = 75^\circ\text{C}$ lortu dugun. Honek baieztatzen du kalkulu teorikoez eta simulazioak bat egiten dutela.

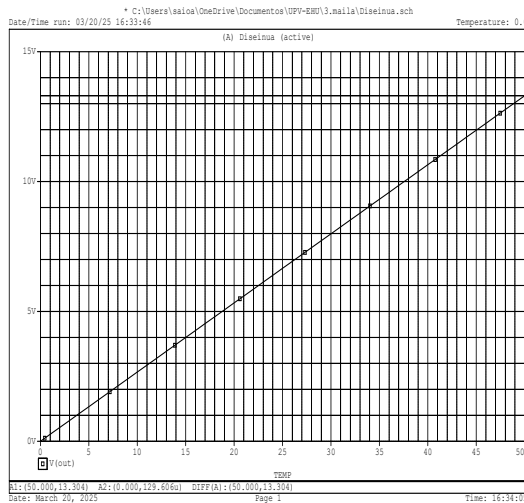
Nahiz eta zirkuitua $[0^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}]$ tartarako diseinatu egon, funtzionamendu erabilgarria 75°C arte hedatu daiteke, temperatura horretara arteko tentsio-irabazia linealtasun egokian mantentzen delako. Puntu horretatik aurrera, OPAMParen saturazioagatik neurketak ez dira fidagarriak izango, eta tentsio-irabazia ez da lineala izango.

Bestalde, irteerako tentsioaren saturazioa ez da $\pm 15\text{V}$ izatera iristen. OPAMP-ak ez ditu elikadura iturrien balio absolutuak guztiz ematen, eta horrek mugatzen du bere irteera maximoa. Kasu honetan, 14.3V inguruan kokatzen da, eta hortik aurrera tentsioa ez da handitzen, nahiz eta sarrera-seinalea (temperatura) handitzen jarraitu.

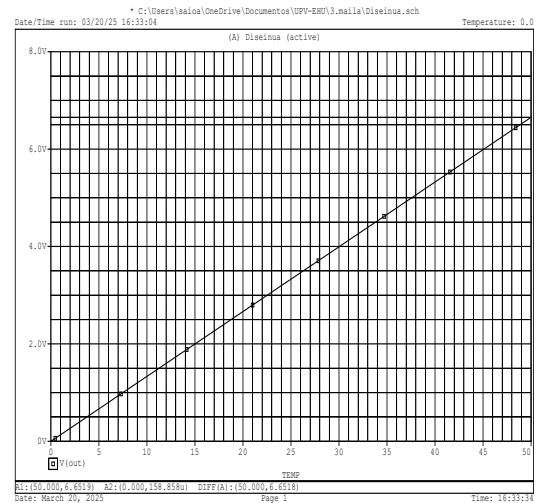
3.2.3 Sentsibilitate aldaketaren behaketa

Lehen azaldu dugun moduan sentsibilitatearen balioa hainbat modutan aldatu daiteke. Atal honetan PSpice-en aztertu ditugu horietako 2 modu.

Lehenengo V_{ref} -en balioa handitu eta txikitu dugu, V_{ref} aldatuz irteerako tentsioa aldatzen delako eta ondorioz sentsibilitatea. Lortu ditugun emaitzak:



(a) $V_{ref}=20\text{V}$



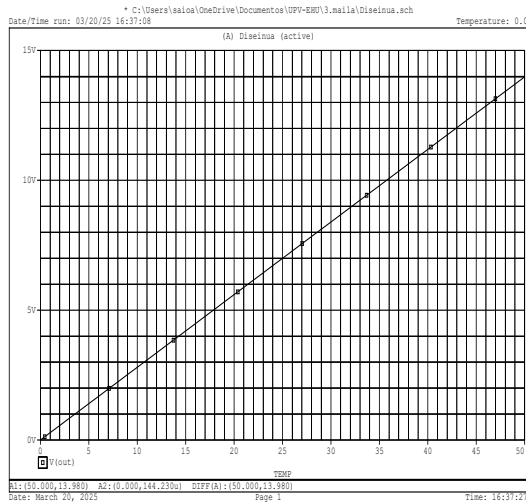
(b) $V_{ref}=10\text{V}$

Irudia 7: V_{ref} -ren eragina sentsibilitatean

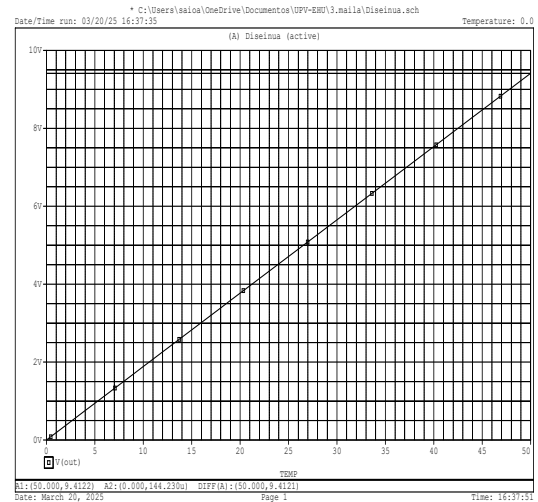
(a) Grafikoaren malda kalkulatu dugu $s = \frac{13.304\text{V}}{50^\circ\text{C}} = 0.266\text{V}/^\circ\text{C}$, bat dator espero genuenarekin, hau da, V_{ref} handiagotzean sentsibilitatea handitzen da.

(b) $s = \frac{6.6519\text{V}}{50^\circ\text{C}} = 0.133\text{V}/^\circ\text{C}$, V_{ref} txikiagotzean sentsibilitatea txikitzen da aurreko atalean ikusitako formuletatik aurreikusi zezakeen moduan.

Ondoren R_g ren balioa aldatu dugu. R_g aldatuz, irabazia (A_{IA}) aldatzen da, horren ondorioz irteerako tentsioa (V_o) eta beraz sentsibilitatea. PSpice-en irteerako tentsioa aztertuz sentsibilitatearen eragina behatu dugu.



(a) $R_g=2k$



(b) $R_g=3k$

Irudia 8: R_g -ren eragina sentsibilitatean

Oraingoan (a)-n R_g txikiagotu dugu eta lortzen dugun malda kalkulatu, $s = \frac{13.980V}{50^\circ C} = 0.279$. R_g txikitzean sentsibilitatea handitzen da.

Bigarrenean, (b) R_g handiagotu dugu eta berriro malda kalkulatu, $s = \frac{9.4122V}{50^\circ C} = 0.188V/^\circ C$, hau da, V_{ref} -ren kontrakoa, R_g handitzean sentsibilitatea txikitzen da eta alderantziz.

Beraz berriro bat dator azaldutako formuletatik aurreikusi genezakeenarekin.

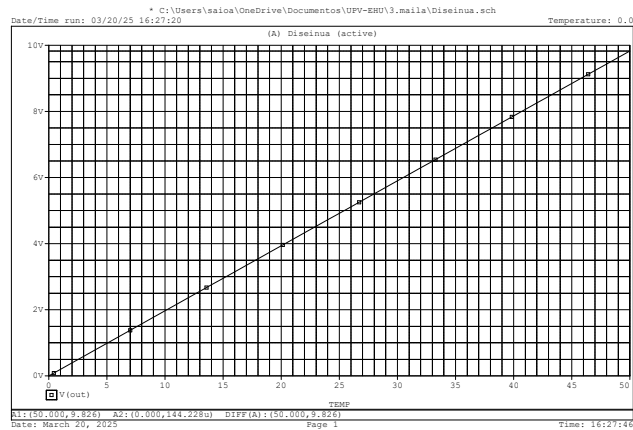
3.3 Diseinuaren egokitzea laborategiko elementuei eta tolerantzien eragina

3.3.1 Laborategiko elementuei egokitzapena

Hasieran zirkuitua diseinatzean sentsibilitatea $0.2V/^\circ C$ izateko erresistentzien balio teoriko batzuk aukeratu/kalkulatu ditugu. Errealitatean diseinua laborategian ditugun osagaietara egokitu behar dugu. Gainera, gure laborategiko osagaiek %2ko tolerantzia izango dute. Beraz, diseinuan erabilitako balioak egokituta hautatu ditugu, beti ere sentsibilitate espezifikazioari ahalik eta gehien hurbiltzeko helburuarekin.

Egokitutako diseinuan, zubiko erresistentzia hauek erabili dira: $R = 10.5k\Omega$, $R_o = 100k\Omega$, eta $R_g = 2.87k\Omega$. Balioak erabaki dira balio teorikotik ahalik eta hurbillen egoteko.

Osagai hauek erabilia, PSpice-en zirkuitua berreraiki dugu eta $[0^\circ C, 50^\circ C]$ tarteko tenperaturetan irteerako tentsioa nola aldatzen den simulatu dugu.



Irudia 9: Irteerako tentsioa osagaiak egokituz

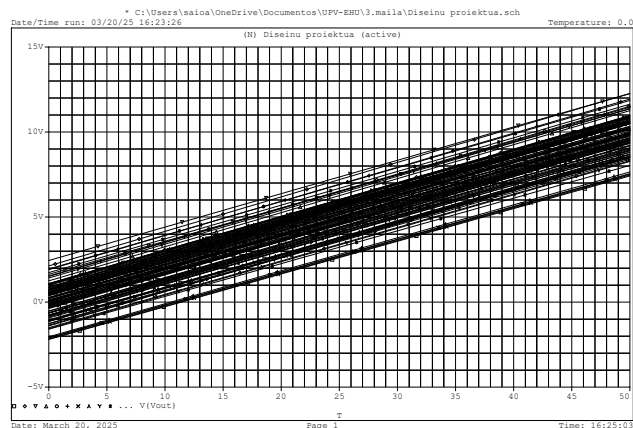
Grafikoan ikus daiteke erresistentzien balioak aldatzeagatik sentzibilitatea aldatu dela. $s = \frac{9.826V}{50^{\circ}C} = 0.1965V/^{\circ}C$ Nahiz eta helburua ($0.2V/^{\circ}C$) zehatz-mehatz ez lortu, lortutako sentzibilitatea oso hurbilekoa da, eta zirkuituak eskatutako portaera mantentzen du.

3.3.2 Tolerantziaren eragina (Montecarlo)

Aurretik aipatu bezala, laborategian erabilitako erresistentziak %2-ko tolerantziakoak dira. Horrek esan nahi du fabrikazio prozesuaren ondorioz haien balio erreala $\pm 2\%$ alda daitekeela balio nominalarekiko. Aldaketa horiek zuzenean eragiten dute zirkuituaren funtzionamenduan, bereziki:

- Wheatstone zubian, oreka-puntuaren desplazamendua eragin dezaketelako, eta ondorioz, irteerako tentsioaren desbiderapenak sor daitezke;
- Instrumentazio anplifikadorearen irabazian, R_g eta beste erresistentzien aldaketek A_{IA} balioa alda dezaketelako;
- Azkenik, zirkuituaren sentzibilitatean, tentsio-aldaketa eta tenperatura arteko erlazioa ez baita balio ideala izango.

Tolerantzia horien benetako eragina baloratzeko, Monte Carlo simulazioa burutu dugu PSpice programan (50 iterazio). Metodo honek simulazio ugari egiten ditu, eta bakoitzean erresistentzien balioak modu ausazkoan aldatzen ditu $\pm 2\%$ barrutian.



Irudia 10: Montecarlo simulazioa

Grafikoan erakusten da irteerako tentsioa gehienetan 10V inguruan mantentzen dela. Iterazio guztietan irteerako tentsioa 9.8V eta 10.2V artean dago gutxi gorabehera, beraz, tolerantziek ez dute zirkuituaren fidagarritasuna nabarmenki kaltetzen. Zirkuituak egonkortasuna mantentzen du osagaien tolerantzien aurrean eta sentsibilitatea ez da modu esanguratsuan degradatzen. Hala ere, baliteke zenbait kasutan irteerako tentsioak (eta beraz, tenperaturaren estimazioa) errore txiki bat izatea, $\pm 2\%$ -ko tolerantzia guztiz kontuan hartuta.

Ondorioz, Monte Carlo simulazioak baieztatzen du gure diseinua praktikan fidagarria eta errepikakorra dela, eta osagaien tolerantziak ez direla arazo nabarmen bat izango.

4 Ondorioak

Diseinu proiektu honetan tenperatura sentsore bat diseinatu, PSpicen implementatu, eta egokitu dugu.

Sistema honetan platinoko RTD bat erabili dugu sentsore gisa, bere erresistentzia tenperaturaren arabera modu linealean aldatzen delako. Zirkuituarentzat emandako zehaztapenak kontuan hartuta, autoberokuntza saihesteko ahalik eta erresistentzia egokienak aukeratu ditugu, eta horrela, irteerako tentsioa kalkulatzeko erabiltzen den espresio linealaren ondoriozko errorea baino ez da geratu.

Errore teorikoa $\Delta T = 0.0922^\circ C$ izan da, eta simulazio bidez PSpice-en lortutako emaitza handiagoa izan da, $\Delta T = 0.1102^\circ C$ koa. Horrek erakusten du simulazioak eta kalkulu teorikoak emaitza oso antzekoak ematen dituztela, nahiz eta faktore praktikoez (adibidez, autoberokuntza edo osagaien ezegokitasuna) diferentzia txiki bat sor dezaketen.

PSpice-n bidez baieztatu dugu RTDn disipatuta geratzen den potentzia 0,25mW-tik behera dagoela tenperatura-tarte osoan. Simulazioen bidez beste hainbat egiaztapen ere egin ditugu: proposatutako tenperatura-tartean zubiaren irteerako tentsioaren portaera aztertu da, eta ikusi da irteerako tentsioa 15V-era iristen denean OPAMP-a saturatzen dela. Horrek erakusten du tenperatura-tartearen mugak kontuan hartu behar direla, irteerako tentsioa gehiegi igo ez dadin eta saturazioa saihestu dadin.

Bestalde, MonteCarlo metodoaren bidez tolerantzien eragina aztertu da, eta emaitzek erakutsi dute erresistentzien aldakortasunak sentsibilitatean eta irteerako tentsioan aldaketa txikiak sor ditzakeela. Hala ere, gehienetan, zirkuituak espero bezala funtzionatzen du eta aldaketak onargarriak dira diseinuaren espezifikazioen barruan.

Amaitzeko, simulazioen eta analisi teorikoaren emaitzak alderatuz, esan daiteke diseinatutako zirkuitua sentsibilitate egokia, egonkortasuna eta fidagarritasuna bermatzen dituen sistema bat dela, tenperatura-tarte osoan neurketa zehatzak egiteko gai dena.