



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

VANUZA MARQUES DO NASCIMENTO

**PLATAFORMA PARA MEDIÇÃO DA CONDUTÂNCIA  
TÉRMICA DE SENSORES TERMORRESISTIVOS**

Campina Grande, Paraíba  
Abril de 2016

VANUZA MARQUES DO NASCIMENTO

PLATAFORMA PARA MEDIÇÃO DA CONDUTÂNCIA  
TÉRMICA DE SENSORES TERMORRESISTIVOS

*Trabalho de conclusão de curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica e Instrumentação

Orientador:

Professor Raimundo Carlos Silvério Freire, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Abril de 2016

VANUZA MARQUES DO NASCIMENTO

# PLATAFORMA PARA MEDIÇÃO DA CONDUTÂNCIA TÉRMICA DE SENSORES TERMORRESISTIVOS

*Trabalho de conclusão de curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como parte  
dos requisitos necessários para a obtenção do grau de  
Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia  
Elétrica.*

Área de Concentração: Microeletrônica, Instrumentação

Aprovado em        /        /

**Professor José Gutemberg de Assis Lira**

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

**Professor Raimundo Carlos Silvério Freire, D. Sc.**

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo durante todo o curso.

Ao meu avô, João Marques dos Santos (*in memoriam*), pela ajuda crucial durante meu primeiro período no curso.

Ao professor Raimundo Freire, pela orientação e disponibilidade irrestrita, não apenas no escopo deste trabalho, mas de muitos outros realizados durante minha graduação.

Aos amigos do Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científica, Bruno, Petrov e Vanderson, pelo grande apoio durante as etapas deste trabalho.

A Júnior Silva Araújo pelo apoio durante todo o curso, principalmente nos períodos iniciais, pelas incontáveis viagens à noite para me buscar na universidade.

Aos amigos que sempre me apoiaram em todos os momentos, que tornaram estes anos de curso mais prazerosos.

## RESUMO

Sensores termorresistivos podem ser utilizadas em estruturas realimentadas para medição de velocidade de fluidos, radiação e temperatura. Na utilização destes sensores é preciso realizar uma caracterização prévia para obter os parâmetros como a constante de tempo, calor específico e a condutância térmica. A condutância térmica é um dos parâmetros mais relevantes, pois quantifica a habilidade do material de trocar energia térmica com o meio. Neste trabalho, implementou-se uma plataforma para a medição da condutância térmica de sensores termorresistivos. Para tanto, desenvolveu-se uma expressão da condutância térmica do sensores termorresistivos do tipo PTC (*Positive Temperature Coefficient*) e NTC (*Negative Temperature Coefficient*). Foi desenvolvido um circuito para a caracterização e tratamento do sinal utilizando-se um microcontrolador com conversor A/D de 10 bits e interface para computador RS-232. A plataforma foi utilizada tanto como interface gráfica quanto para o tratamento dos dados de forma que pode ser utilizada por qualquer usuário que necessite caracterizar sensores termorresistivos do tipo PTC e tipo NTC.

**Palavras-chave:** Condutância elétrica, Sensores termorresistivos, Caracterização elétrica.

## ABSTRACT

Thermoresistive sensors are used in feedback structures for measurement fluid velocity, radiation, and temperature. When using these sensors it is necessary to perform a prior characterization to obtain parameters such as time constant, specific heat and thermal conductance. The thermal conductance is one of the most relevant parameters essential knowledge, because it quantifies the ability of the material to exchange thermal energy with the environment. In this work, a platform for measuring the thermal conductance of thermoresistive sensors was implemented. Therefore, the thermal conductance expression for thermoresistive sensor for sensors of types PTC (Positive Temperature coefficient) and NTC (Negative Temperature coefficient) was developed. A circuit for characterization was designed. A circuit for characterization and signal processing was developed using a microcontroller that features a 10 bits A/D converter and RS-232 interface computer. The platform was used both as graphical interface and for the processing data so that it can be used by any user who needs to characterize thermoresistive sensors of PTC and NTC types.

**Key-words:** Thermal Conductance, Thermoresistive sensors, Electrical Characterization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Circuito realimentado utilizando sensor termorresistivo aquecido a temperatura constante: (a) saída analógica; (b) saída modulada; (c) forma de onda de $V_p$ .....	13
Figura 2 - Diagrama do Circuito de caracterização.....	18
Figura 3 - Conversão do sinal PWM para tensão analógica utilizando filtro passa baixas de primeira ordem.....	19
Figura 4 - Fonte de corrente.....	20
Figura 5 - Inversor.....	20
Figura 6 - Leiaute do circuito.....	21
Figura 7 - Menu de inicialização dos dados do sensor.....	22
Figura 8 - Resultados apresentados pela interface gráfica para o sensor NTC 2,2 k $\Omega$ . .....	25
Figura 9 - Resultados apresentados pela interface gráfica para o sensor PTC 10 k $\Omega$ .....	26

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores utilizados nas medições .....	21
Tabela 2 - características dos sensores utilizados.....	25

# SUMÁRIO

## SUMÁRIO

Agradecimentos .....	iv
Resumo .....	v
Lista de Ilustrações .....	vii
Lista de Tabelas .....	viii
Sumário.....	ix
1 Introdução .....	9
2 Fundamentação Teórica.....	11
2.1 Sensores PTC e NTC .....	11
2.2 Princípio da Equivalência Elétrica.....	12
2.3 Condutância Térmica.....	14
3 Materiais e Métodos.....	18
3.1 Circuito de caracterização.....	18
3.1.1 Conversor D/A .....	19
3.1.2 Fonte de Corrente.....	19
3.2 Circuito completo de caracterização.....	20
3.3 Sensores termorresistivos utilizados.....	21
3.1 Interface Gráfica .....	21
4 Resultados.....	24
5 Conclusões .....	28
Bibliografia.....	29

## 1 INTRODUÇÃO

Várias etapas são necessárias para o desenvolvimento de sensores: concepção, fabricação e caracterização. Em cada um destas etapas, parâmetros dos sensores são extraídos para análise e os processos de desenvolvimento dos mesmos são aprimorados.

A etapa de caracterização é uma das etapas fundamentais para o conhecimento do comportamento do sensor e conseqüentemente da grandeza a ser monitorada. É preciso realizar a caracterização de cada componente para posteriormente efetuar uma

comparação com os resultados simulados e verificar o funcionamento real do dispositivo.

Sensores termorresistivos são utilizados para a medição de grandezas como a temperatura, radiação e velocidade dos fluidos devido à baixa capacidade térmica e grande variação da resistência em função da temperatura. Utiliza-se do princípio da equivalência elétrica para as medições, em que a modificação da resistência elétrica do sensor é dada devido à variação da grandeza física a ser medida. [1]

Existem diversos parâmetros para a caracterização de um sensor termorresistivo, tais como *TCR* (*Temperature Coeficiente Resistance*), condutância térmica, responsividade, sensibilidade, detectividade, linearidade e constante de tempo [2].

A condutância térmica é a característica do material de conduzir energia térmica devido a um gradiente de temperatura. Em outras palavras, é um fenômeno causado por uma diferença de temperatura entre duas regiões em um mesmo meio. É uma figura de mérito importante, pois afeta diretamente a constante de tempo e a sensibilidade do sensor, logo, também tem interferência no desempenho do mesmo [3].

Com o aumento da condutância térmica, há uma diminuição da constante de tempo e ocorre uma maior perda de energia do sensor para o ambiente, resultando na redução da sensibilidade [4]. Este parâmetro é difícil de determinar devido à composição do sensor, que não é homogênea, além da geometria e da área visto que são de tamanho bastante reduzido e difíceis de obter-se o valor exato. [1]

Neste trabalho são apresentados resultados experimentais de um circuito projetado para medição da condutância térmica de sensores termorresistivos do tipo PTC (*Positive Temperature Coeficient*) e NTC (*Negative Temperature Coeficient*). Para tanto, foram desenvolvidas as expressões para o cálculo da condutância térmica e foi utilizado um circuito para caracterização com interface utilizando-se o software LabVIEW.

O Capítulo 2 deste trabalho contém a fundamentação teórica sobre sensores termorresistivos e de suas expressões características, assim como as expressões da condutância térmica. O Capítulo 3, os materiais e métodos utilizados na caracterização do sensor são apresentados bem como os parâmetros dos sensores que foram utilizados nos ensaios. No Capítulo 4, os resultados e discussões são apresentados. Por fim, o Capítulo 5 corresponde às conclusões.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, a fundamentação teórica de sensores termorresistivos é apresentada para a compreensão de seu funcionamento, suas expressões características assim como a importância destes sensores em suas aplicações.

Como o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para a medição da condutância térmica dos sensores termorresistivos, um estudo teórico sobre sensores termorresistivos e suas principais aplicações será apresentado para enfatizar a importância da medição prévia deste parâmetro.

Primeiramente, o embasamento teórico de sensores termorresistivos do tipo NTC e PTC é apresentado. Em seguida, a configuração clássica para medição de grandezas físicas utilizando sensores termorresistivos é apresentada juntamente com suas expressões. Por fim, deduziu-se a expressão para o cálculo da condutância elétrica de sensores termorresistivos.

### 2.1 SENSORES PTC E NTC

Sensores termorresistivos são utilizados, dentre outras aplicações, na medição de temperatura, radiação solar, potência de micro-ondas e velocidade de fluidos [9]. Sensores utilizados na medição de radiação solar podem ser classificados como térmicos e fotoelétricos.

Nos sensores classificados como térmicos, a radiação é medida variando-se a temperatura do sensor, dada absorção da radiação incidente sobre o mesmo. Ou seja, a variação da temperatura corresponde à radiação absorvida, logo não são seletivos à distribuição espectral de energia e apresentam resposta lenta. Os sensores do tipo fotoelétricos, por sua vez, possuem seletividade à distribuição espectral de energia e sua temperatura não varia, logo apresentam uma resposta rápida.

O projeto de um equipamento para medição de determinada grandeza física, baseada em sensores termorresistivos requer, o um modelo matemático capaz de descrever o comportamento estático e dinâmico deste sensor.

O comportamento do sensor pode ser obtido a partir da aplicação das leis da física que regem o funcionamento do dispositivo, com uma descrição das propriedades

físicas do sensor ou com a descrição do comportamento elétrico em termos das relações entre os valores das variáveis do sensor.

Um sensor termorresistivo do tipo PTC (*Positive Temperature Sensor*) possui a característica de aumentar sua resistência em função do acréscimo do valor da temperatura. Na expressão (1), a relação entre a resistência elétrica do sensor/termistor e sua temperatura, está representada:

$$R_s \cong R_0(1 + \beta \cdot T_s), \quad (1)$$

em que  $R_0$  é a resistência do sensor a  $0^\circ\text{C}$  e  $\beta$  é o seu coeficiente de temperatura.

Já para um sensor termoresistivo NTC (*Negative Temperature Sensor*), a resistência diminui com o aumento da temperatura, é dada aproximadamente pela expressão de Steinhart-Hart, representada em (2):

$$R_s \cong R_0 \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad (2)$$

em que  $R_0$  é a resistência do sensor em uma temperatura de referência  $T_0$  em Kelvin e  $B$  é o seu coeficiente de temperatura.

Estes sensores são bastante utilizados na medição de radiação, temperatura ou velocidade de fluidos. Para isto, usa-se o princípio da equivalência elétrica em que a grandeza de entrada é convertida um sinal elétrico na saída do circuito de medição [5-7].

## 2.2 PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA ELÉTRICA

O comportamento dos sensores PTCs e NTCs para a medição da temperatura, radiação ou velocidade de fluidos no equilíbrio, pode ser descrito quantitativamente a partir da Primeira Lei da Termodinâmica.

Especificamente para a medição de radiação, em regime permanente, tem-se a expressão (3), em que  $\alpha$  é o coeficiente de absorção,  $S$  é a área exposta a radiação incidente,  $H$  é a radiação incidente na superfície do sensor,  $P_s$  é a potência elétrica do sensor,  $U$  é a constante de troca de calor do sensor com o ambiente,  $T_s$  é a temperatura do sensor e  $T_a$  a temperatura ambiente.

$$\alpha \cdot S \cdot H + P_s = U \cdot S \cdot (T_s - T_a) \quad (3)$$

A arquitetura clássica para a medição de grandezas físicas baseadas em sensores termorresistivos utiliza a Ponte de Wheatstone juntamente com amplificador operacional com realimentação negativa, como pode ser observado na Figura 1. [7]

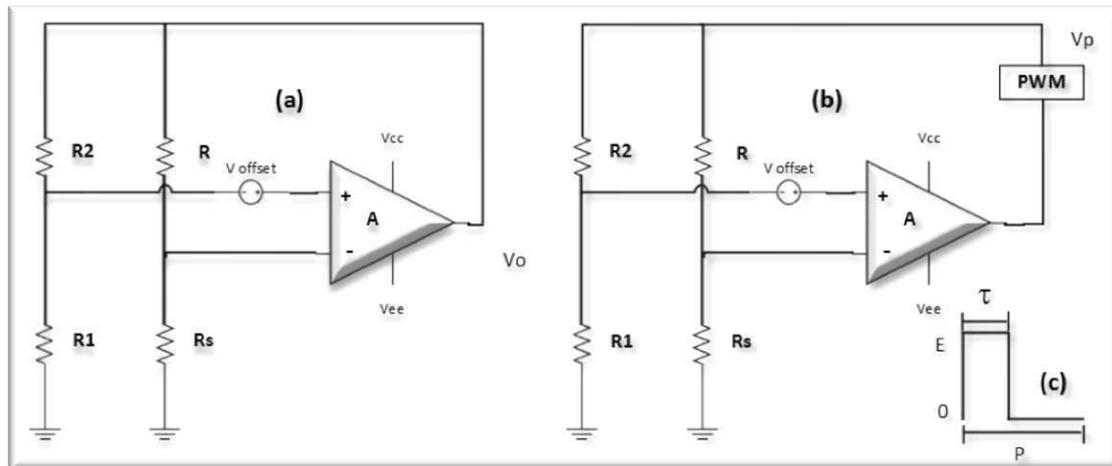


FIGURA 1 – CIRCUITO REALIMENTADO UTILIZANDO SENSOR TERMORRESISTIVO AQUECIDO A TEMPERATURA CONSTANTE: (A) SAÍDA ANALÓGICA; (B) SAÍDA MODULADA; (C) FORMA DE ONDA DE VP

A realimentação negativa do amplificador operacional tem por objetivo manter a ponte de Wheatstone em equilíbrio. Uma das quatro resistências da Ponte de Wheatstone utilizada é representada pelo sensor termorresistivo. Portanto, a temperatura do sensor permanece constante. Dada uma variação na grandeza de entrada, ocorrerá um desequilíbrio na ponte, fazendo com que o amplificador operacional varie a tensão de saída. Logo, a potência dissipada no sensor também é compensada e a ponte retorna ao equilíbrio. [8]

O circuito da Figura 1b corresponde à configuração com saída modulada. Um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) é inserido na saída do amplificador operacional para que o sinal de saída seja modulado em largura de pulso com base no sinal modulante  $V_o$ .

A partir da Figura 1, pela análise do circuito, tem-se que a tensão do sensor termorresistivo é representada por (4):

$$V_s = \frac{R_s \cdot V_o}{R_s + R} \quad (4)$$

portanto, considerando ainda  $V_{os} = 0$  e ganho infinito em malha aberta, tem-se:

$$\frac{V_s}{V_o} = \frac{R_s}{R_s + R} = k. \quad (5)$$

Isolando-se a tensão de saída  $V_o$  na expressão (6) tem-se:

$$V_o = \sqrt{\frac{R_s}{k^2} \cdot [U \cdot S \cdot (T_s - T_a) - \alpha \cdot S \cdot H]}. \quad (6)$$

Para o circuito da Figura 1b a tensão de saída é dada pela expressão:

$$V_{ef} = E \sqrt{\frac{\tau}{p}}. \quad (7)$$

Logo, ao substituir (10) em (9) tem-se que a saída do circuito é dada por

$$\frac{\tau}{p} = \frac{1}{k^2 E^2} \cdot R_s [U \cdot S \cdot (T_s - T_a) - \alpha \cdot S \cdot H]. \quad (8)$$

Pode ser observado em (9) e (11) que o sinal de saída do circuito é proporcional à condutância térmica. Isso implica que, para fazer-se qualquer medição de grandezas físicas como radiação e velocidade de fluidos, é preciso antes extrair a condutância térmica do sensor.

Analisando detalhadamente a troca de calor no sensor, tem-se que quanto maior a condutância térmica maior será a interferência da temperatura ambiente, considerando a medição à temperatura constante.

## 2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Os métodos de transferência de energia térmica são apresentados para melhor compreensão dos processos físicos que ocorrem no sensor durante as medições. A transferência de calor de um corpo ocorre por três formas: radiação, convecção e condução.

### 2.3.1 RADIAÇÃO

A radiação é um processo pelo qual o calor flui de um corpo de maior temperatura para um de menor temperatura quando os dois estão separados no espaço, ainda que exista um vácuo entre eles.

O termo radiação é geralmente aplicado para todas as espécies de fenômenos de ondas eletromagnéticas, mas, na transmissão de calor, são de interesse apenas os fenômenos que resultam da diferença de temperatura e que sejam capazes de transportar energia através de um meio transparente ou através do espaço.

Como a intensidade de radiação é função da temperatura e da natureza da superfície, todos os corpos emitem continuamente calor radiante. A energia radiante tem a velocidade da luz, correspondente à (300.000 km/s). A luz e a radiação térmica diferem apenas nos respectivos comprimentos de onda.

### 2.3.2 CONVECÇÃO

A convecção é um processo de transporte de energia que se difere da condução, em que o calor é transmitido de átomo a átomo sucessivamente. Na convecção, a propagação do calor é realizada pelo movimento do fluido envolvendo transporte de matéria.

O calor fluirá por condução da superfície para as partículas adjacentes do fluido. A energia assim transferida servirá para aumentar a temperatura e a energia interna dessas partículas. Então as partículas fluidas se movem para uma região de menor temperatura no fluido, onde se misturarão e transferirão uma parte de sua energia para outras partículas fluidas.

### 2.3.3 CONDUÇÃO

A condução é um processo de troca de calor por comunicação molecular direta. O calor flui de uma região de maior temperatura para uma região de menor temperatura em um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou em meios em contato.

A transferência de calor é dada pela vibração dos átomos um contra o outro ou pelo movimento dos átomos. A condução é maior em materiais sólidos, em que uma rede de relações espaciais relativamente fixas entre átomos ajuda a transferir energia entre eles por vibração. Assim, quanto mais rápido se movem as moléculas, maior será a temperatura a energia interna do elemento de matéria.

Quando as moléculas em uma região adquirem uma energia cinética média, maior do que aquela das moléculas das regiões adjacentes, conforme manifestado por

uma diferença de temperatura, as moléculas possuidoras de maior energia transmitirão parte de sua energia para as moléculas da região de temperatura mais baixa.

## 2.4 CONDUTÂNCIA TÉRMICA

A condutância térmica quantifica a habilidade do material de conduzir energia térmica. Ela quantifica a troca de calor entre o sensor e o meio que ele está contido por meio da convecção. Sensores fabricados com materiais de alta condutância térmica conduzem energia térmica de forma mais rápida e eficiente que estruturas análogas feitas de materiais com baixa condutividade térmica.

No caso dos sensores termorresistivos aplicados na medição de grandezas físicas, é importante que a condutância térmica seja baixa, uma vez que quanto menor for a condutância térmica, menor será a troca de calor com o ambiente.

Pode-se observar nas expressões (9) e (11) que o sinal de saída dada uma condutância térmica baixa, tem maior variação devido à grandeza que se deseja medir, nesse caso a radiação incidente  $H$ , e não pela diferença de temperatura com o ambiente.

Para o cálculo da condutância térmica, utiliza-se a expressão da primeira Lei da Termodinâmica (6) considerando radiação nula, ou seja,  $H = 0$ . Tem-se:

$$P_s = U.S.(T_s - T_a), \quad (9)$$

$$\frac{P_s}{(T_s - T_a)} = U.S, \quad (10)$$

em que  $U.S$  é a condutância térmica do sensor multiplicada pela área do mesmo, chamando a condutância térmica de  $G$  (W/K) e substituindo a expressão da potência elétrica, tem-se:

$$G = \frac{VI}{(T_s - T_a)}. \quad (11)$$

Dada a análise do comportamento do sensor termorresistivo apresentada na fundamentação teórica, tendo como base a expressão da conservação da energia (3), determinou-se que a condutância térmica de um sensor termorresistivo é função de sua

potência elétrica e da diferença de temperatura entre ele e o meio em que o mesmo está contido.

Pode ser observado a partir de (13) que, por estímulo de uma corrente elétrica pelo sensor termorresistivo e medindo sua tensão, assim como a temperatura ambiente, pode-se calcular a condutância térmica do sensor.

O cálculo da temperatura do sensor  $T_s$  é efetuado a partir dos valores da tensão e corrente que passam sobre o mesmo. Partindo-se das expressões características para sensores do tipo PTC e NTC, sabendo-se sua resistência é possível calcular sua temperatura isolando-se  $T_s$  das expressões (1) e (2). Tem-se:

$$PTC: T_s = \frac{\frac{R_s}{R_o} - 1}{B}, \quad (12)$$

$$NTC: R_s = \frac{1}{\frac{\ln \frac{R_s}{R_o}}{B} - \frac{1}{T_o}}. \quad (13)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o cálculo da condutância térmica é preciso conhecer a potência elétrica dissipada no sensor, logo, foi implementada uma fonte de corrente controlada por tensão para a excitação do sensor e monitorou-se sua tensão.

#### 3.1 CIRCUITO DE CARACTERIZAÇÃO

O diagrama de blocos do circuito é apresentado na Figura 2. Cada estágio do circuito será descrito em seguida.



FIGURA 2 - DIAGRAMA DO CIRCUITO DE CARACTERIZAÇÃO

A medição da condutância térmica de um sensor termorresistivo foi implementada com auxílio de um circuito contendo uma fonte de corrente e monitorando a tensão do sensor para obter a potência dissipada, assim como sua temperatura.

Assumindo que os parâmetros  $R_0$  e  $B$  do modelo do sensor são conhecidos, os ensaios foram realizados com auxílio do microcontrolador ATMEGA328.

O microcontrolador ATMEGA328 é um dispositivo de 8 bits com 32 KB de memória flash, 2 KB de memória RAM e 1 KB de EEPROM. O mesmo possui comparador analógico interno, 6 canais de PWM e corrente máxima de saída por pino de 40 mA, corrente suficiente para realizar os experimentos [9].

A aquisição dos dados referentes à tensão no sensor e temperatura ambiente foi realizada pelo microcontrolador, assim como o sinal PWM gerado para excitação do circuito. A placa foi interligada ao computador com interface USB (*Universal Serial Bus*) em que o software LabVIEW realiza o tratamento dos dados e apresenta na interface gráfica os resultados.

### 3.1.1 CONVERSOR D/A

O microcontrolador utilizado neste trabalho não dispõe de saídas analógicas, entretanto, como há seis canais de saída PWM, foi utilizado um destes para gerar um sinal analógico com auxílio de um filtro passa-baixas.

O sinal do PWM gerado pela placa possui uma frequência de 490 Hz e amplitude de 5 V. Foi projetado um filtro passa-baixas passivo de primeira ordem para fazer a conversão da tensão digital para analógica.

Na saída do filtro, um circuito *buffer* foi utilizado para que a corrente drenada pelo circuito seja fornecida pelo amplificador operacional e não pelo capacitor do filtro.

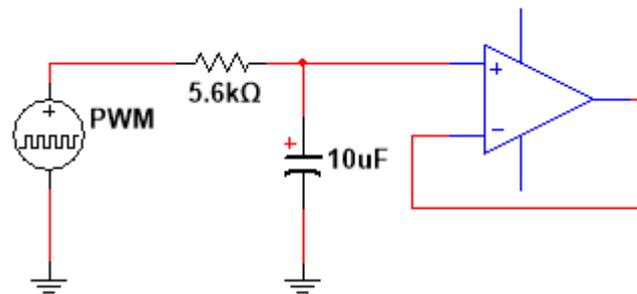


FIGURA 3 - CONVERSÃO DO SINAL PWM PARA TENSÃO ANALÓGICA UTILIZANDO FILTRO PASSA BAIXAS DE PRIMEIRA ORDEM

### 3.1.2 FONTE DE CORRENTE

Para a excitação do sensor, foi projetada uma fonte de corrente, conforme apresentada na Figura 4. O circuito é composto de um resistor de 1 kΩ e o sensor, que está representado pela resistência  $R_s$ . Como a saída do circuito do conversor D/A resulta numa tensão analógica que varia entre 0 e 5 V, a corrente que passará pelo resistor de 1 kΩ, que é a mesma que passa pelo resistor  $R_s$  é dada por:

$$I_s = \frac{V_{in}}{1k} = V_{in} (mA) \quad (14)$$

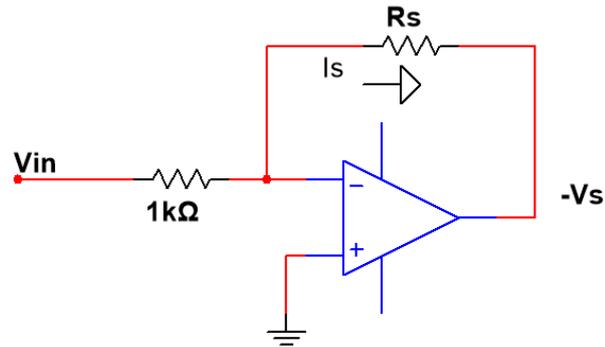


FIGURA 4 - FONTE DE CORRENTE

Como a impedância de entrada do amplificador operacional é elevada, isso implica dizer que a mesma corrente que passa pelo resistor passará pelo sensor, como pode ser observado na Figura 4. Como a tensão do sensor resulta numa tensão negativa ( $V_s$ ), foi utilizado um circuito inversor de ganho unitário, conforme visto na Figura 5, pois o fundo de escala do conversor A/D do microcontrolador vai de 0 à 5 V. Logo, a tensão na saída do inversor é  $V_{out} = -V_{inp}$ .

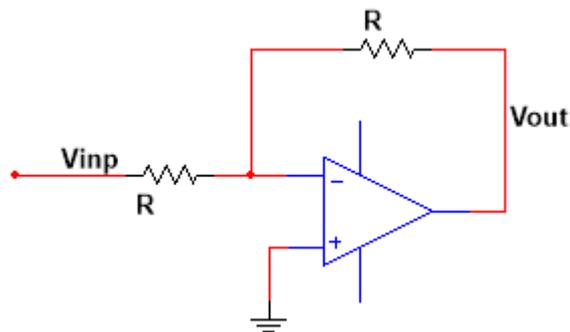


FIGURA 5 - INVERSOR

### 3.2 CIRCUITO COMPLETO DE CARACTERIZAÇÃO

Após definidos os componentes do circuito de caracterização, o leiaute foi projetado no software Eagle (*Easy Applicable Graphical Layout Editor*) e a placa de circuito impresso foi confeccionada, como pode ser observado na Figura 6.



Uma vez que o sensor é conectado ao circuito, o usuário deve indicar no menu, ilustrado na Figura 7, contido na interface gráfica, qual o tipo do sensor deseja caracterizar. Tendo indicado o tipo, ele deve inserir os valores de  $R_0$  e  $B/\beta$  (NTC/PTC) do sensor que está utilizando que são facilmente encontrados na folha de dados do fabricante.

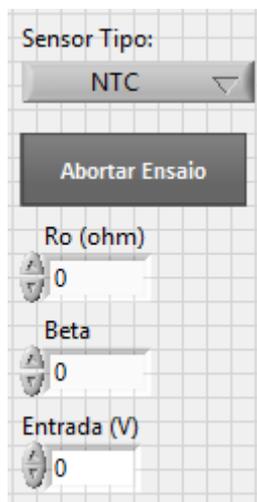


FIGURA 7 - MENU DE INICIALIZAÇÃO DOS DADOS DO SENSOR

A segunda etapa do processo de caracterização é a escolha da corrente que passará pelo sensor. Alguns fabricantes indicam a potência máxima que pode ser dissipada no sensor. O usuário tem a escolha de inserir valores de tensão de 0 a 5 V, o que implica em correntes de 0 à 5 mA. Como o conversor A/D do microcontrolador tem fundo de escala de 0 à 5 V, é importante observar qual a tensão de saída do circuito para que esta não sature. Logo, caso a tensão de saída atinja a saturação, deve-se diminuir a corrente que passa pelo o sensor para que a condutância seja calculada de forma correta.

Uma vez inserido esses parâmetros basta iniciar o programa. Na tela inicial, a condutância térmica é indicada juntamente com os gráficos da tensão de entrada, tensão no sensor, temperatura do sensor, temperatura ambiente e condutância térmica.

A partir dos dados de corrente e tensão no sensor termorresistivo, pode-se facilmente calcular a potência elétrica pela expressão

$$P = VI \quad (15)$$

Com os mesmos dados, pode-se calcular a resistência do sensor dada corrente elétrica:

$$R_s = V/I \quad (16)$$

Uma vez calculada a resistência elétrica do sensor, extrai-se a temperatura do mesmo, utilizando as expressões características dos sensores PTC e NTC (12) e (13).

Para a medição da temperatura ambiente, um sensor LM35 foi utilizado e conectado ao circuito para a leitura no momento da caracterização do sensor. Uma vez estes dados medidos, a condutância térmica dada pela expressão (17) é calculada e apresentada na interface.

$$G = \frac{P}{T_s - T_o}, \quad (17)$$

em que P é a potência elétrica dissipada no sensor,  $T_s$  é a temperatura do sensor,  $T_o$  é a temperatura ambiente.

## 4 RESULTADOS

Neste item são apresentados os principais resultados referentes à medição da condutância térmica de sensores termorresistivos do tipo PTC e NTC.

Inicialmente, um ensaio com sensor do tipo NTC foi realizado. A interface gráfica ilustrada na Figura 8 apresenta os resultados em que se observa a tensão de entrada de 2 V, o que implica uma corrente de 2 mA.

O monitoramento da tensão de saída do circuito é extremamente importante para que não haja saturação do conversor A/D durante a medição. Na escolha da tensão de entrada, que definirá a corrente que passará pelo sensor, tem-se que considerar o valor da resistência à temperatura ambiente e testar os valores para que a tensão de saída não exceda valores maiores que 5 V.

A tensão de entrada do circuito, denominada “Entrada”, é medida e plotada no primeiro gráfico da interface. A leitura da temperatura ambiente é realizada por meio do sensor LM35 e apresentada no indicador à esquerda. A temperatura do sensor e a condutância térmica, denominados “G” e “Temperatura do sensor” são calculados a cada ponto e plotados nos gráficos da direita. Por fim, a tensão medida sobre o sensor, denominada “Tensão de Entrada”, é plotada no segundo gráfico na esquerda e se refere a entrada do conversor A/D do circuito.

Devido a ruídos durante a medição, colocou-se a condutância térmica de forma numérica, abaixo dos gráficos. Este valor foi calculado fazendo-se a média a cada ponto a partir do ponto 200. Escolheu-se este ponto durante as medições, pois a curva fica estável e não há mudança brusca de amplitude.

Os ensaios foram realizados com duração de 5 s, a uma frequência de amostragem de 100 Hz. Este tempo foi escolhido respeitando-se a constante de tempo de cada sensor utilizado. Notou-se ao realizar os ensaios num tempo menor, o sensor não atingiu a estabilidade, devido a sua elevada constante de tempo.

Os valores medidos não podem ser comparados com outras referências, pois não foram encontrados valores de condutância térmica para sensores fabricados com mesmo material e tamanho. Entretanto, a Tabela 2 contém os resultados dos sensores caracterizados no laboratório e suas características.

TABELA 2 - Parâmetros dos sensores utilizados

		<b>R<sub>0</sub> (Ω)</b>	<b>B</b>	<b>S (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>G (W/K)</b>
<b>NTC</b>	NTC50603E3222FMT	2,2 k	3650	1,28	0,0018
<b>PTC</b>	32208655	10 k	0,00385	1,2	0,0002
<b>NTC</b>	NCP18XQ102E03RB	1k	3650	1,28	0,0022

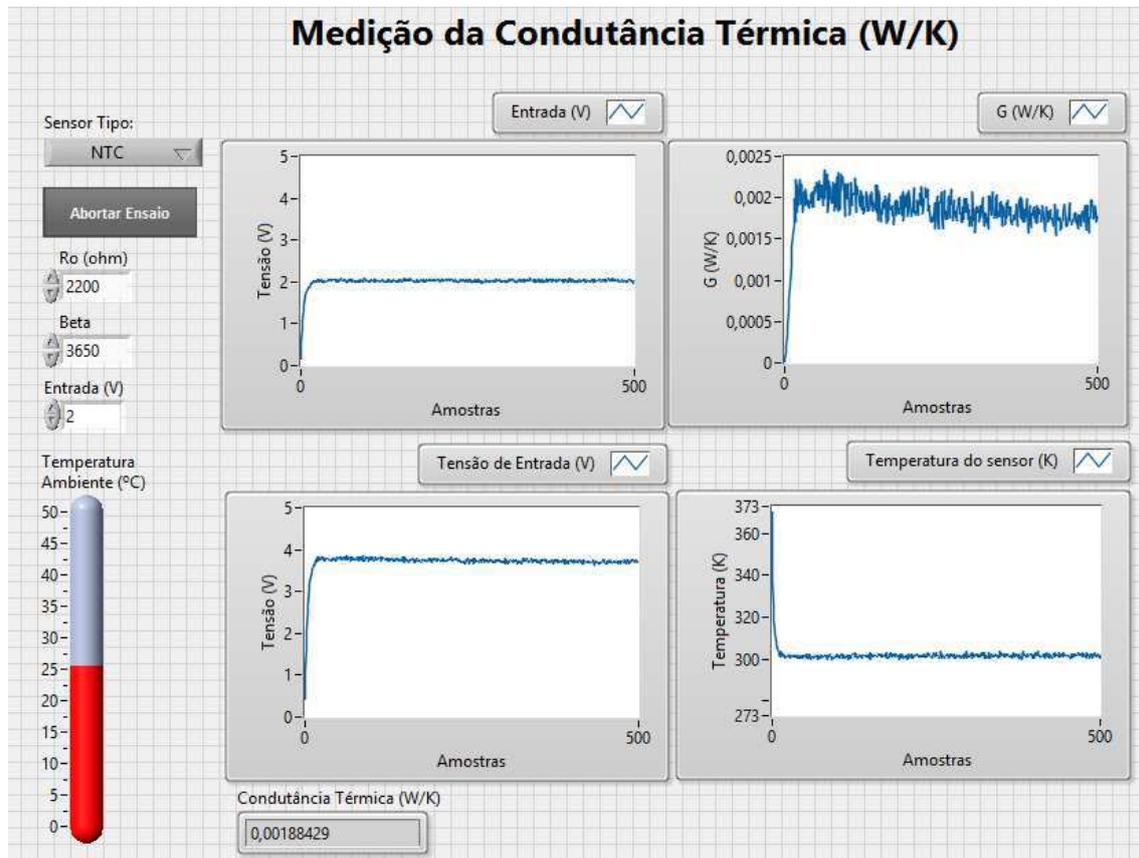


FIGURA 8 - Resultados apresentados pela interface gráfica para o sensor NTC 2,2 KΩ.

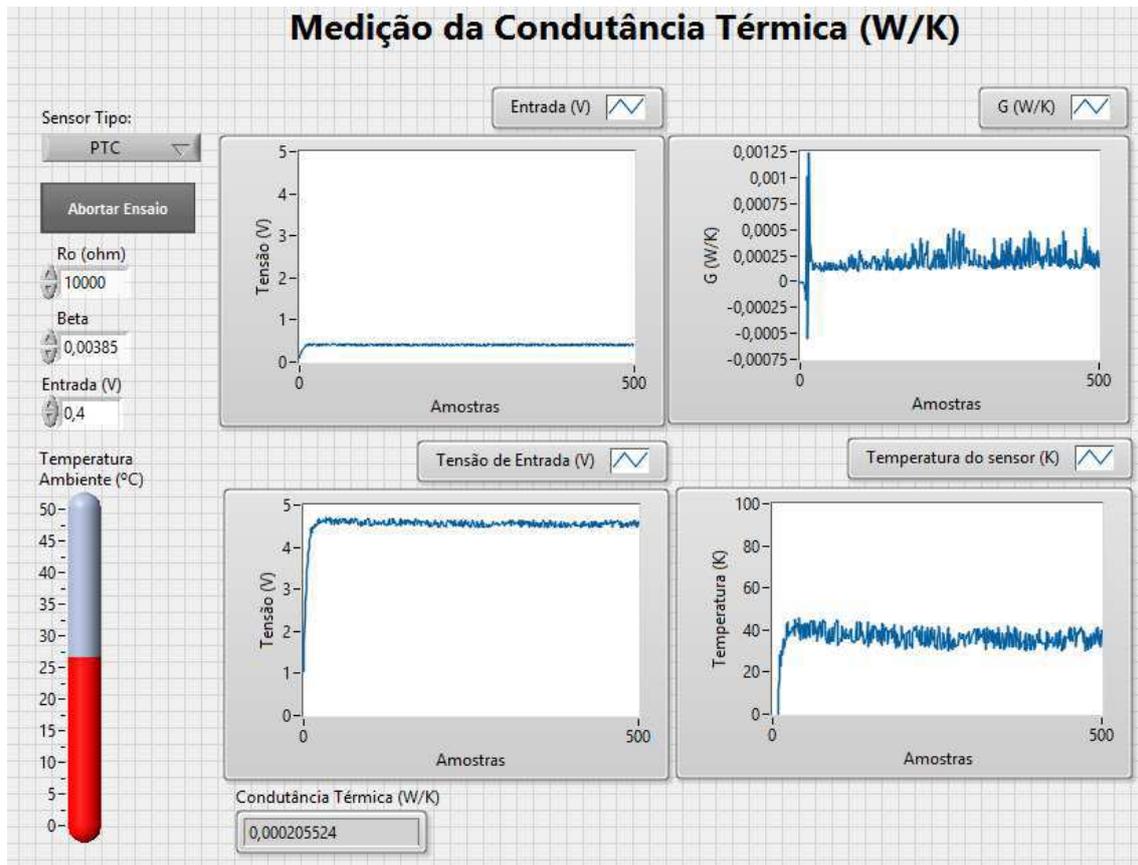


FIGURA 9 - Resultados apresentados pela interface gráfica para o sensor PTC 10 k $\Omega$

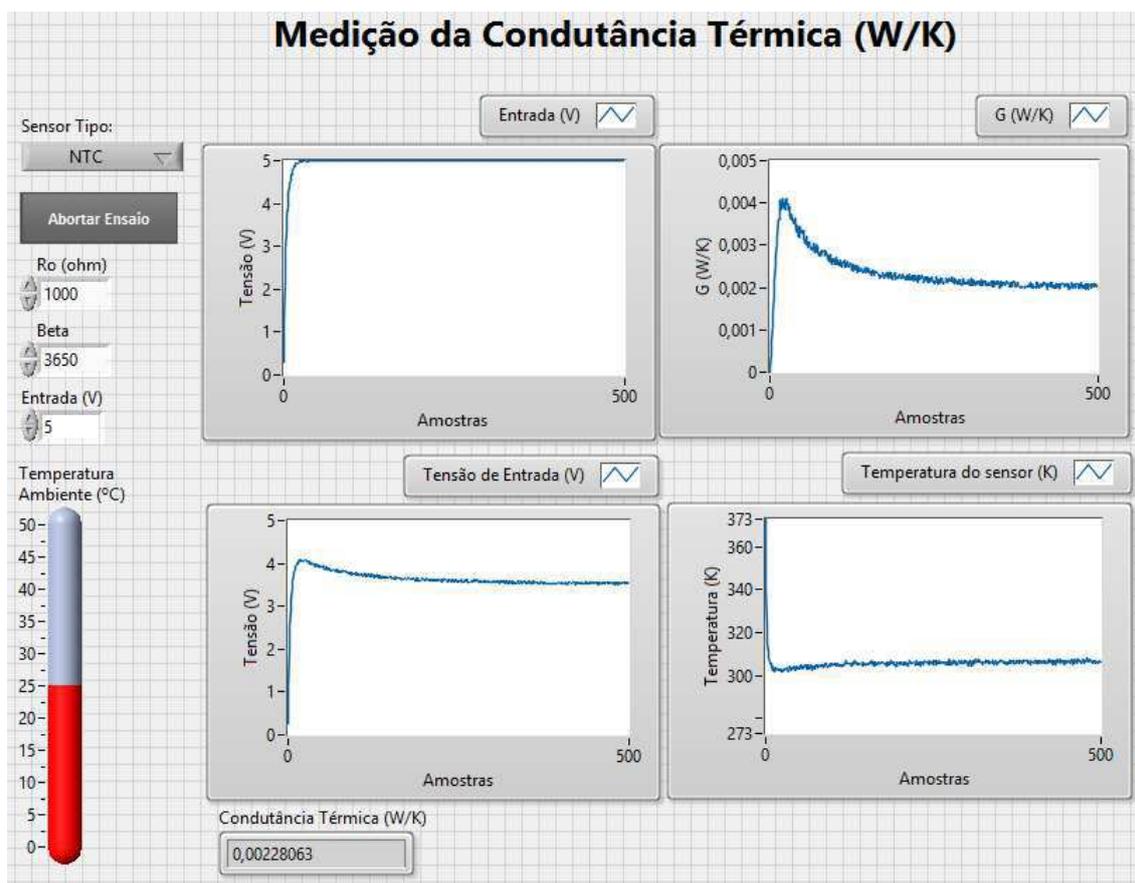


FIGURA 10 - RESULTADOS APRESENTADOS PELA INTERFACE GRÁFICA PARA O SENSOR NTC 1 K $\Omega$

A partir dos resultados experimentais, observou-se que a condutância térmica dos dois sensores NTC utilizados possuem valores próximos. A proximidade entre os valores é esperada, visto que os dois possuem a mesma área, a troca de calor com o ambiente é proporcional à área do sensor.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi implementada uma interface gráfica para a medição da condutância térmica de sensores termorresistivos do tipo PTC e NTC. Para tanto, foram desenvolvidas expressões para o cálculo da condutância térmica para os dois tipos de sensores. Foi projetado um circuito para caracterização, utilizando um microcontrolador para o tratamento dos dados e foi implementada uma interface gráfica para apresentar os resultados.

No momento da caracterização, o sensor estava em um ambiente totalmente fechado de forma que não houvesse mudança de temperatura nem ventilação no meio em que ele estava contido para que não interferisse na temperatura do sensor e, consequentemente, no cálculo da condutância térmica.

A principal contribuição deste trabalho é o projeto de um circuito e interface de fácil utilização, em que, qualquer usuário que esteja trabalhando com sensores termorresistivos possa rapidamente extrair a condutância térmica do sensor.

Como trabalho futuro, pode-se utilizar os mesmos materiais para obtenção de outros parâmetros do sensor como o coeficiente de temperatura, calor específico e  $R_0$  para obter-se uma completa caracterização do sensor antes de utilizá-los em circuitos para aplicações. Pode-se também fabricar um recipiente para isolar o máximo possível o sensor do meio externo para que a interferência de ventilação e variação da temperatura seja a mínima possível.

## BIBLIOGRAFIA

[1] José S. R. Neto. (1994). Caracterização de Sensores Termo-resistivos. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Campina Grande – PB, Brazil.

[2] Felipe Lorenzo Della Lucia (2008). *Microbolômetros Resistivos em Membrana Suspensa*. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, Campinas – SP

[3] A. Qliveira, J. S. Rocha Neto, G. S. Deep, R. C. S. Freire (1996). *Thermoresistive Sensor Parameters from Its Static IxV Characteristics*. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC , Bruxelas, Bélgica.

[3] Gurdip. S. Deep, S. R. (Fevereiro - 1996). Thermoresistive Radiation Sensor Response Time Employing Electrical Heating. IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement, .45(No.1), pp. 332-335.

[4] Chaquibe. C. Farias, (1995). Considerações de Projeto de um Radiômetro Solar de Equivalência Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Campina Grande – PB, Brazil.

[5] Ivan S. S. Silva, Raimundo C. S. Freire. (2002). Architectures of Anemometers Using the Electric Equivalence Principle. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, (pp. 397-401). Anchorage - AK, USA

[6] Raimundo C. S. Freire, G. S. Deep. (1997). Effect of Operational Amplifier Parameters on the Performance of Feedback Structures with Thermoresistive Sensors. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, (pp. 898-903). Ottawa, Canada.

[7] Raimundo C. S. Freire, Sebastian Y. C. Catunda, Benedito A. Luciano (2009). Applications of Thermoresistive Sensors Using the Electric Equivalence. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Campina Grande – PB, Brazil.

[8] Petrov Crescencio Lobo (2014), *Radiômetro Solar de Equivalência Elétrica com Sensor Aquecido à Diferença de Temperatura Constante*. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Campina Grande – PB, Brazil.

[9] [http://www.mouser.com/pdfdocs/Gravitech\\_ATMEGA328\\_datasheet.pdf](http://www.mouser.com/pdfdocs/Gravitech_ATMEGA328_datasheet.pdf).  
Acessado em 15/02/2016

