

# **PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM TRANSDUTOR SIGMA-DELTA TÉRMICO LINEAR**

Defesa de Dissertação de Mestrado

**Valter da Conceição Rosa**

Lígia Souza Palma, Dra  
Amauri Oliveira, Dr.  
Orientadores

# Sumário

- Introdução
- Revisão Bibliográfica
- Transdutor Sigma-Delta Térmico
- Implementação Física
- Conclusões e Trabalhos Futuros

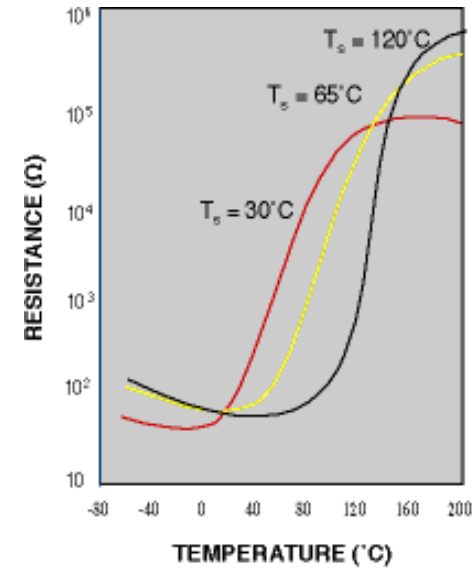
# Introdução

- Sistemas realimentados com sensor termoresistivo, usando o princípio do balanceamento de potência, tem sido empregados em medições de radiação térmica, velocidade de fluido e temperatura.
- O método mais utilizado é o de temperatura constante.
- A configuração mais simples usa o sensor numa ponte de Wheatstone em que o sinal de saída não é linear com a grandeza medida.
- Na configuração sigma-delta o sinal de saída é linear com a grandeza medida.
- Resultados de simulação matemática desta arquitetura já foram apresentados para medição de radiação térmica.
- Aqui são propostos, analisados e implementados, dois circuitos baseados na arquitetura sigma-delta com a apresentação dos resultados de simulação e experimentais para medição de temperatura.
- É proposta e analisada também, uma versão do circuito para medição de radiação térmica.

# Revisão Bibliográfica

## Termistores

- São dispositivos passivos de dois terminais que variam, de forma importante, sua resistência elétrica com a sua temperatura.
- São constituídos por ligas especiais de semicondutores e usados como sensores de temperatura, radiação térmica e velocidade de fluidos.
- Termistores *NTC* são compostos principalmente por óxidos de metais de transição como o cromo, manganês, cobalto, ferro, níquel, titânio, lítio, formando um semicondutor policristalino.
- Termistores *PTC* são compostos principalmente por semicondutor tipo N, dopado com titanato de bário ( $\text{BaTiO}_3$ ) que apresenta um aumento significativo de sua sensibilidade na temperatura Curie.



Varição da Resistência de um Termistor com sua Temperatura para diferentes temperaturas Curie.

# Revisão Bibliográfica

## Comportamento Estático dos Termistores

$$\frac{1}{T} = \sum_{i=0}^N A_i (\ln R)^i \quad \text{Steinhart e Hart para NTC}$$

$$\frac{1}{T} = A_0 + A_1 (\ln R) + A_3 (\ln R)^3$$

$$R_{NTC} = A e^{\frac{B}{T}}$$

$$R_{PTC} = A_0 e^{\beta T}$$

$$R_{NTC} = R_0 \left[ 1 - B \left( \frac{T - T_0}{T_0^2} \right) \right]$$

$$R_{PTC} = R_0 [1 + \beta(T - T_0)]$$

$$R_{NTC} = k_1 T + k_2$$

$$R_{PTC} = k_1 T + k_2$$

$$k_1 = -\frac{R_0 B}{T_0^2}$$

$$k_1 = R_0 \beta$$

$$k_2 = R_0 \left( 1 + \frac{B}{T_0} \right)$$

$$k_2 = R_0 (1 - \beta T_0)$$

# Revisão Bibliográfica

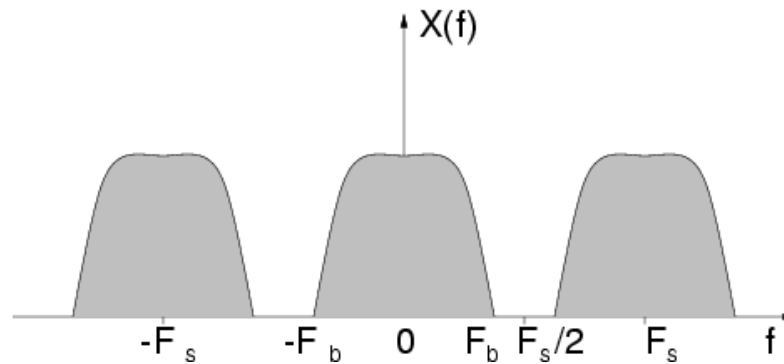
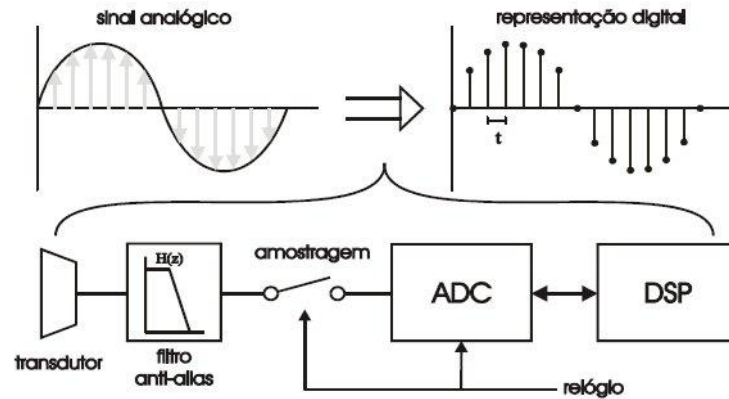
## Comportamento Dinâmico dos Termistores

$$R_s(t)I^2(t) + G_H H(t) = G_{th}[T_s(t) - T_a(t)] + C_{th} \frac{dT_s(t)}{dt}$$

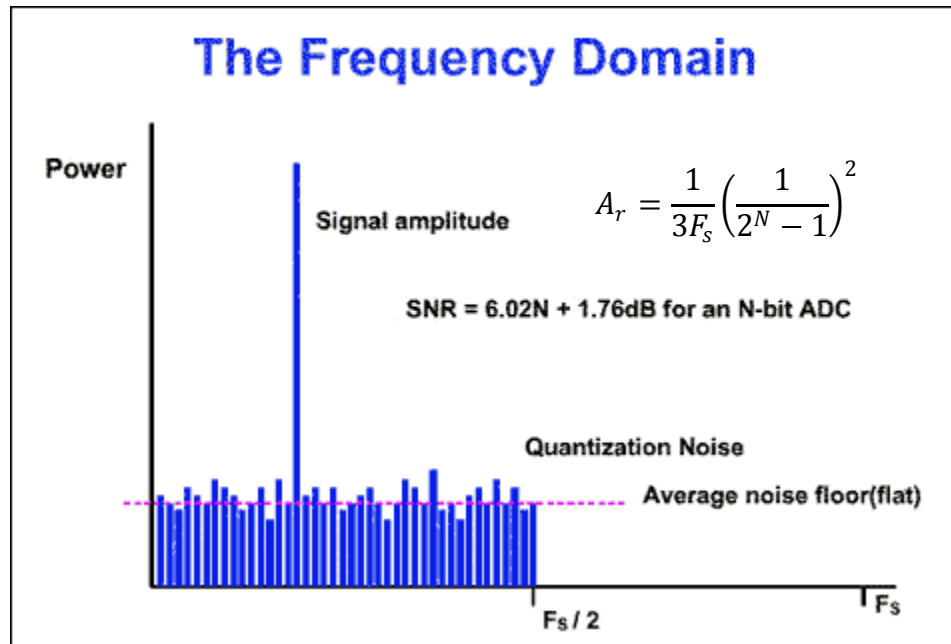
$$T_s = \frac{1}{C_{th}} \int [R_s I^2 + G_H H - G_{th}(T_s - T_a)] dt$$

$$p = \frac{[G_{th0}(T_{s0} - T_{a0}) - G_{H0}H_0]k_1 - R_{s0}G_{th0}}{R_{s0}C_{th0}}$$

# Conversores Sigma-Delta

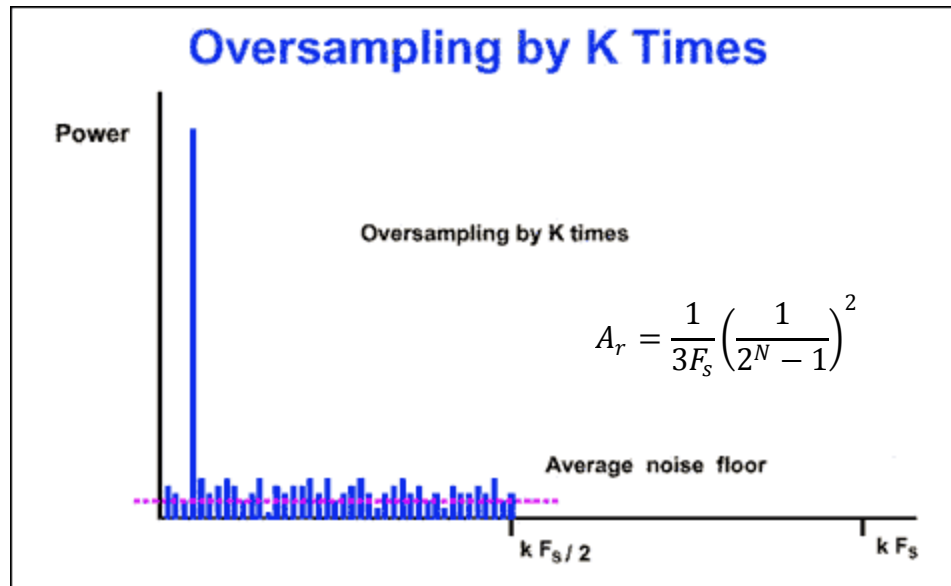


# Conversores Sigma-Delta



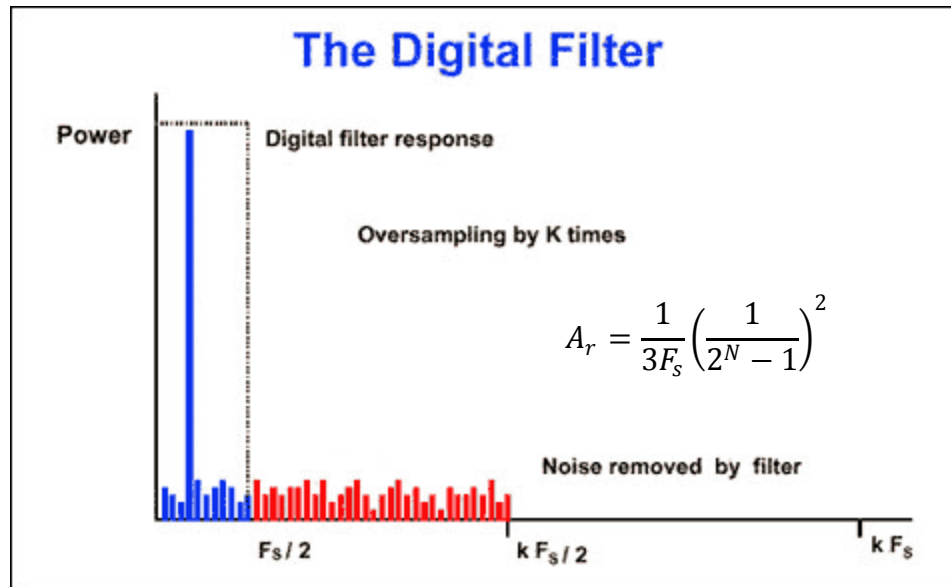
FFT de um ADC convencional com frequência de amostragem  $F_s$ .

# Conversores Sigma-Delta



FFT de um ADC convencional com frequência de amostragem  $kF_s$ .

# Conversores Sigma-Delta



Ação do filtro passa baixas na SNR de um sinal sobreamostrado.

A relação SNR melhora apenas 3 dB para cada duplicação da frequência de amostragem.

# Conversores Sigma-Delta

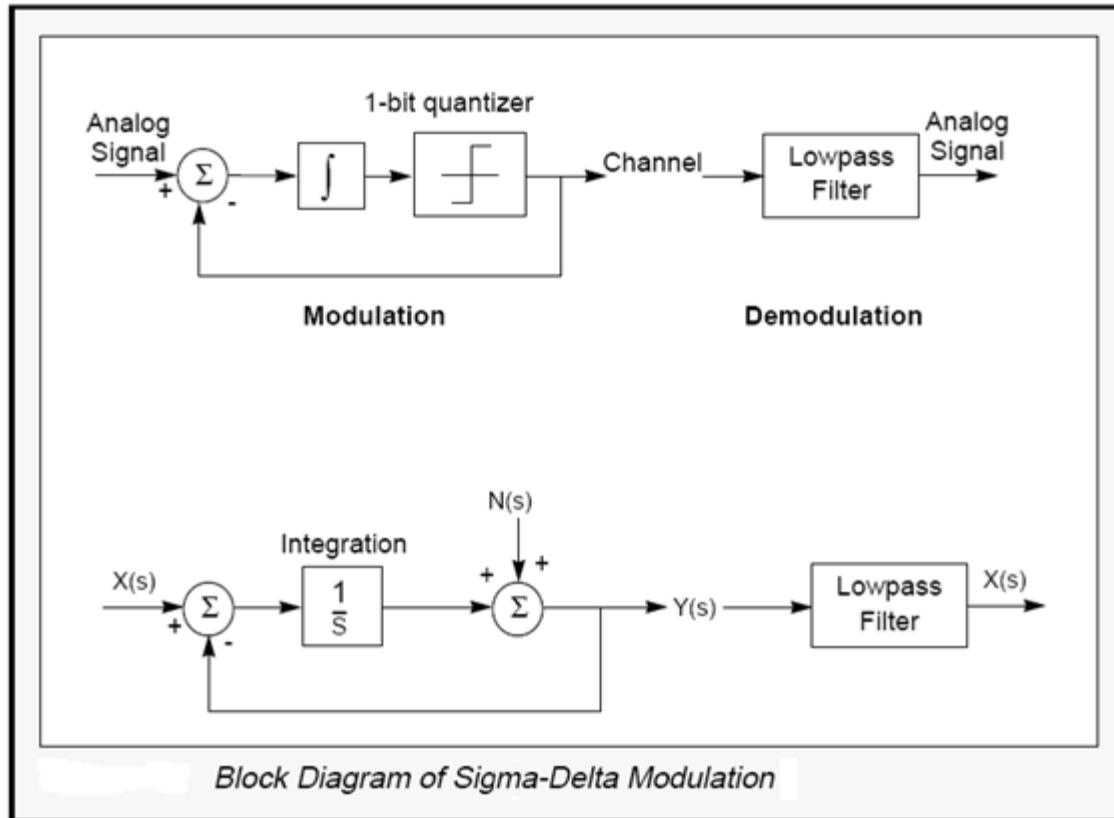
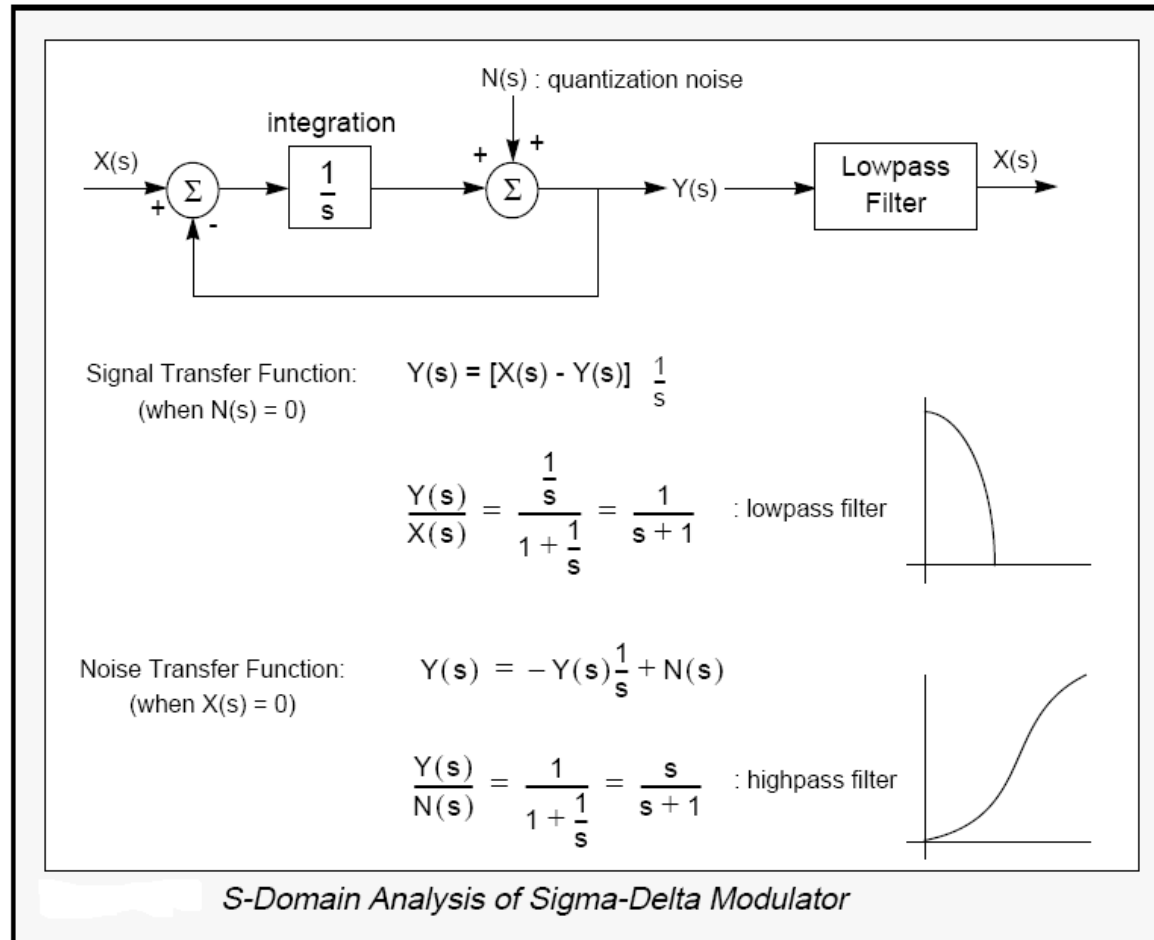


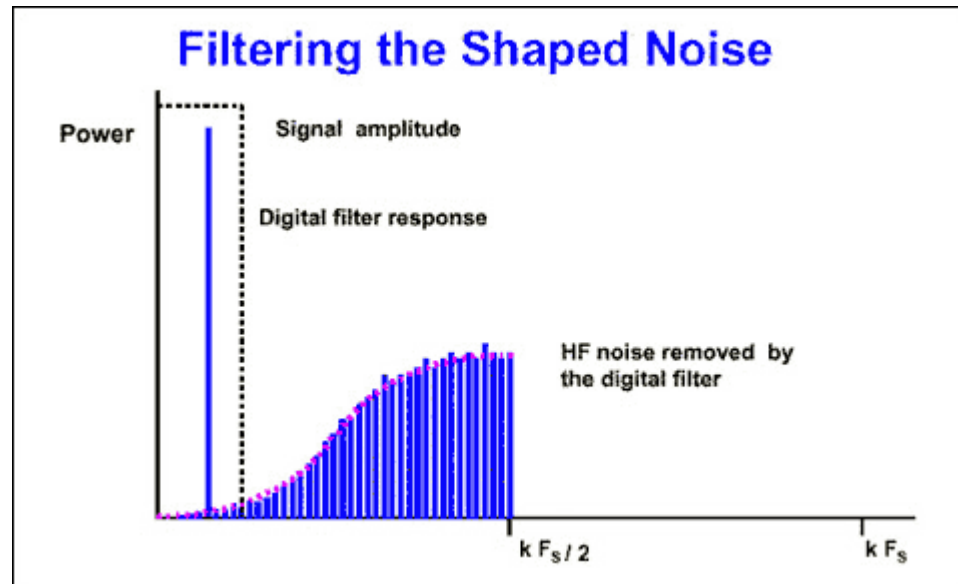
Diagrama em blocos do Modulador Sigma-Delta de primeira ordem.

# Conversores Sigma-Delta



**Análise do modulador Sigma-Delta no domínio da frequência.**

# Conversores Sigma-Delta

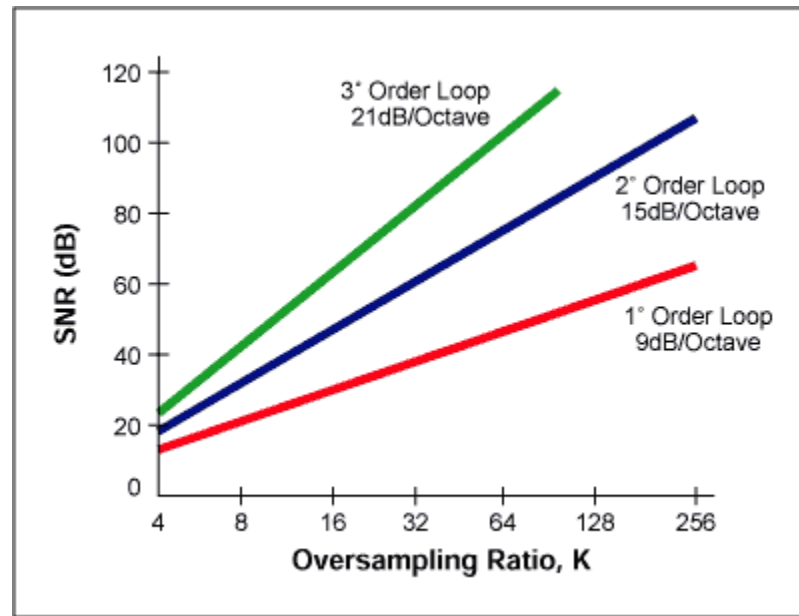


Efeito da modulação Sigma-Delta no sinal e no ruído de quantização.

$$SNR = 30 \log(OSR) - 1,906$$

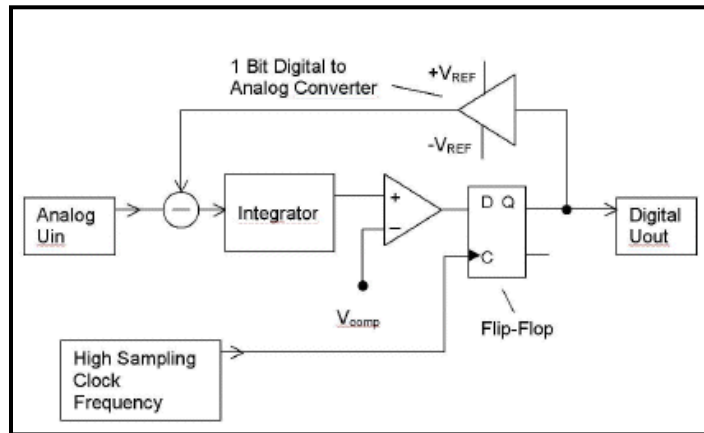
A relação sinal/ruído melhora 9 dB para cada duplicação da freqüência de amostragem.

# Conversores Sigma-Delta

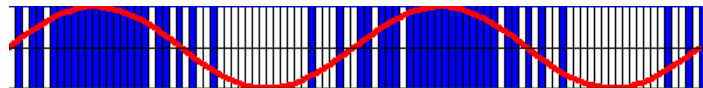


Relação entre SNR e OSR para Modulador Sigma-Delta de ordem superior.

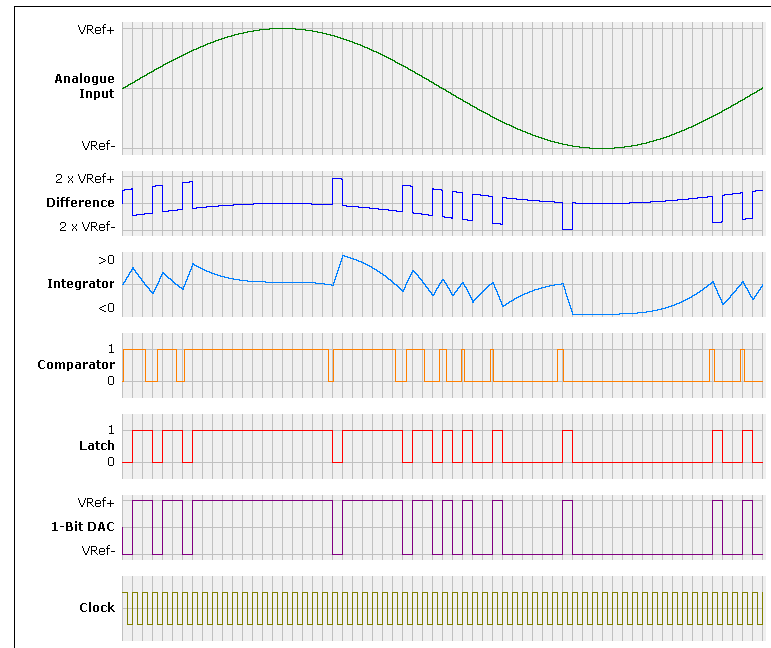
# Conversores Sigma-Delta



Detalhes de implementação do Modulador Sigma-Delta.

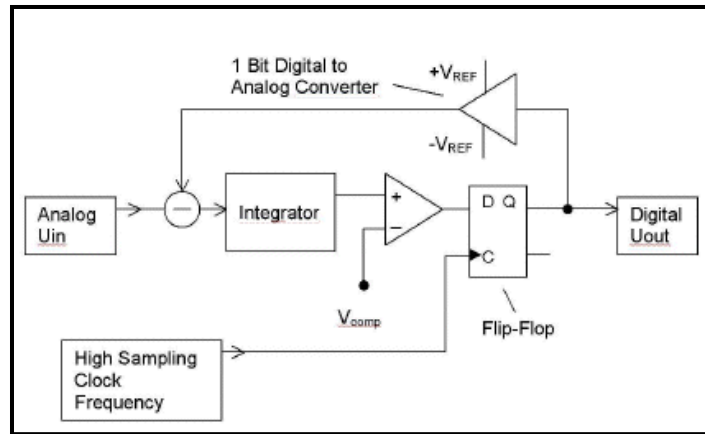


Modulação por Densidade de Pulso.

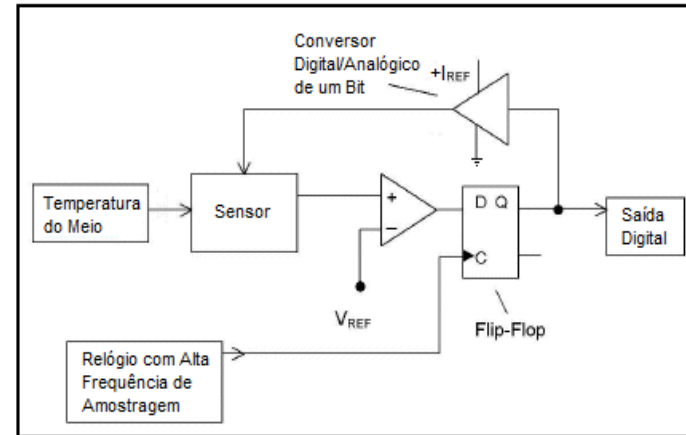


Sinais internos do Modulador Sigma-Delta analógico de primeira ordem.

# Transdutor Sigma-Delta Térmico

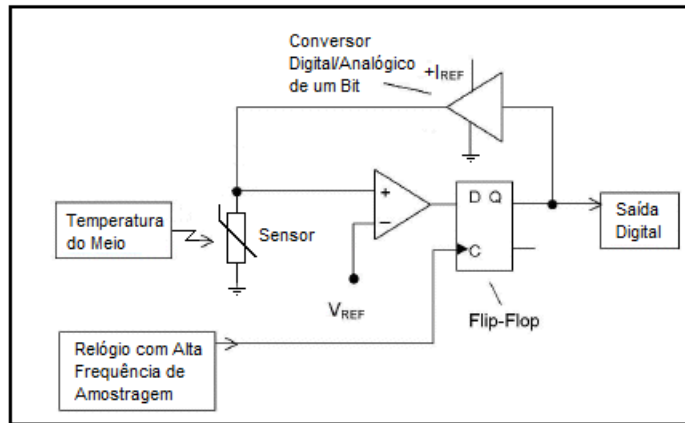


**Detalhes de implementação do Modulador Sigma-Delta.**

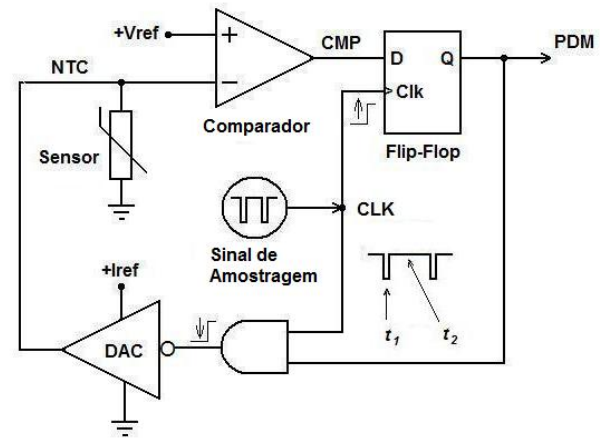


**Topologia do Modulador Sigma-Delta com sensor termo-resistivo.**

# Transdutor Sigma-Delta Térmico



**Conexão do Termistor na topologia Sigma-Delta.**



**Topologia proposta para o circuito do modulador térmico.**

# Transdutor Sigma-Delta Térmico

## Análise do Circuito

O equilíbrio térmico só é possível se a potência média fornecida ao sensor pelo circuito for igual à potência média dissipada pelo mesmo.

$$R_s(t)I^2(t) + G_H H(t) = G_{th}[T_s(t) - T_a(t)] + C_{th} \frac{dT_s(t)}{dt}$$

$$P_i = G_{th0}(T_{s0} - T_a) \quad (1)$$

$$P_{max} = G_{th0}(T_{s0} - T_{min}) \quad (2)$$

$$P_{min} = G_{th0}(T_{s0} - T_{max}) \quad (3)$$

$$P_{max} = V_{ref} I_{ref} \quad (4)$$

$$P_{min} = P_{max} \left( \frac{t_1}{t_1 + t_2} \right) \quad (5)$$

# Transdutor Sigma-Delta Térmico

## Análise do Circuito

Substituindo (2) e (3) em (5):  $T_{s0} = T_{max} + \rho_t \Delta T$  (6)

Substituindo (6) em (2):  $P_{max} = G_{th0} \Delta T (\rho_t + 1)$  (7)

Em que:  $\rho_t = \frac{t_1}{t_2}$

Sabendo-se que :  $V_{ref} = I_{ref} R_{s0}$

$$V_{ref} = \sqrt{G_{th0} \Delta T (\rho_t + 1) R_{s0}} \quad I_{ref} = \sqrt{G_{th0} \Delta T (\rho_t + 1) / R_{s0}}$$

Só é necessário conhecer os parâmetros do sensor na temperatura de operação  $T_{s0}$ .

# Transdutor Sigma-Delta Térmico

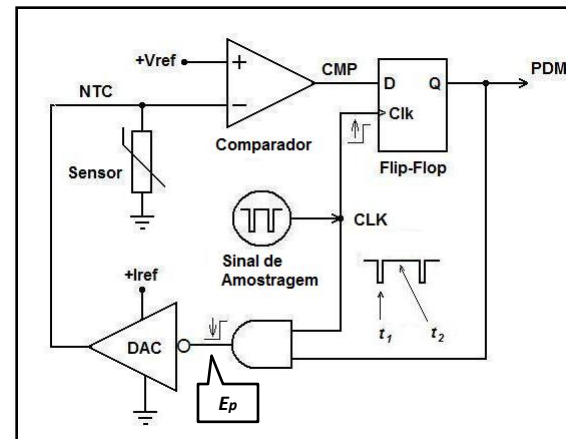
## Linearidade

Sinal de potência fornecida ao sensor pelo DAC.

$$P(t) = P_{max} (1 - E_p(t)) \quad (11)$$

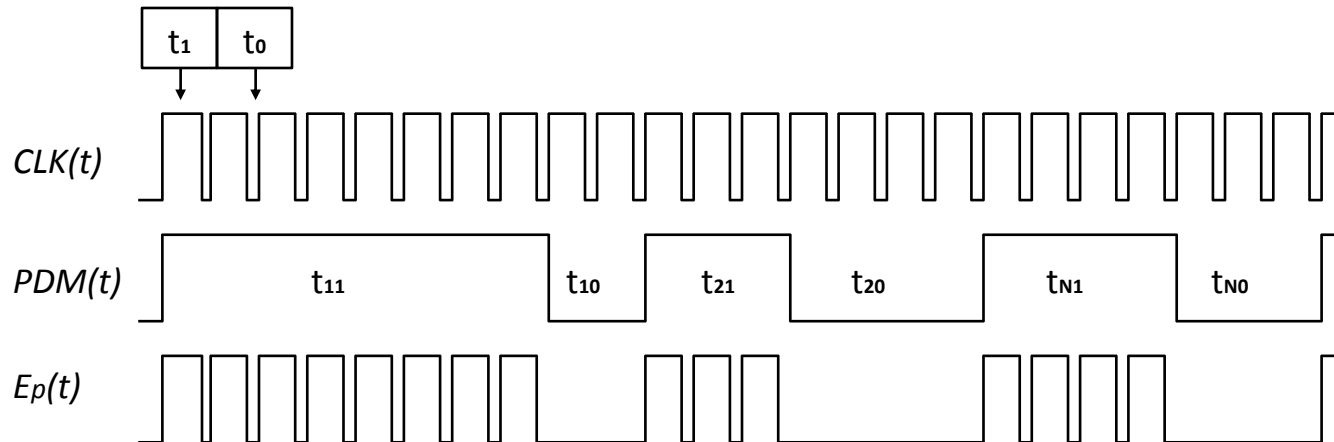
$$\overline{P(t)} = P_{max} (1 - \overline{E_p(t)}) \quad (12)$$

$$P_i = P_{max} (1 - \overline{clk} \overline{pdm}) \quad (13)$$



# Transdutor Sigma-Delta Térmico

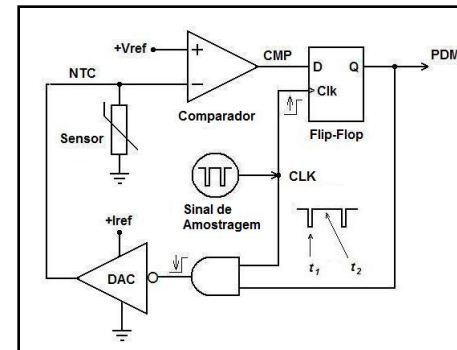
## Linearidade



$$\overline{E_p(t)} = \frac{t_1 \frac{t_{11}}{t_1 + t_0} + t_1 \frac{t_{21}}{t_1 + t_0} + \dots + t_1 \frac{t_{N1}}{t_1 + t_0}}{t_{11} + t_{10} + t_{11} + t_{10} + \dots + t_{N1} + t_{N0}}$$

$$\overline{E_p(t)} = \frac{t_1}{t_1 + t_0} \left( \frac{t_{11} + t_{21} + \dots + t_{N1}}{t_{11} + t_{10} + t_{11} + t_{10} + \dots + t_{N1} + t_{N0}} \right)$$

$$\overline{E_p(t)} = \overline{clk} \overline{pdm}$$



# Transdutor Sigma-Delta Térmico

## Linearidade

Substituindo ( 1 ) e ( 7 ) em ( 13 )

$$T_{s0} - T_a = \Delta T(\rho_t + 1)(1 - \overline{clk} \overline{pdm}) \quad (14)$$

$$\overline{clk} = \frac{1}{\rho_t + 1} \quad (15)$$

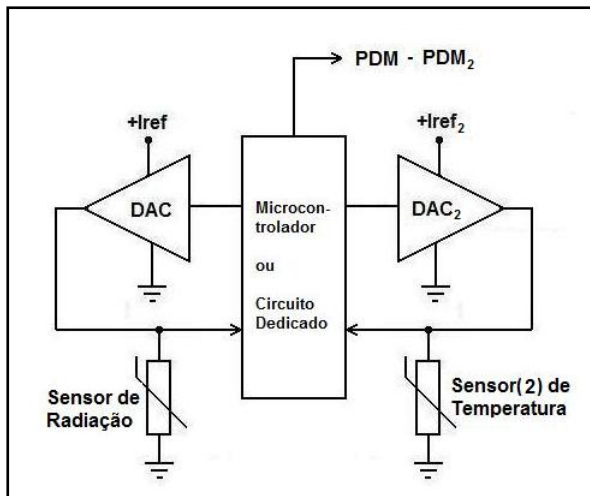
$$T_{s0} - T_a = \Delta T(\rho_t + 1) \left( 1 - \frac{\overline{pdm}}{\rho_t + 1} \right) \quad (16)$$

$$T_{max} + \rho_t \Delta T - T_a = \Delta T(\rho_t + 1) \left( 1 - \frac{\overline{pdm}}{\rho_t + 1} \right) \quad (17)$$

$$T_a = T_{min} + \Delta T \overline{pdm} \quad (18)$$

# Transdutor Sigma-Delta Térmico

## Radiômetro



Circuito proposto para medição de radiação térmica.

$$P_i + G_H H = G_{th}(T_s - T_a) + C_{th} \frac{dT_s}{dt}$$

$$P_i + A_{th} H = G_{th}(T_s - T_a)$$

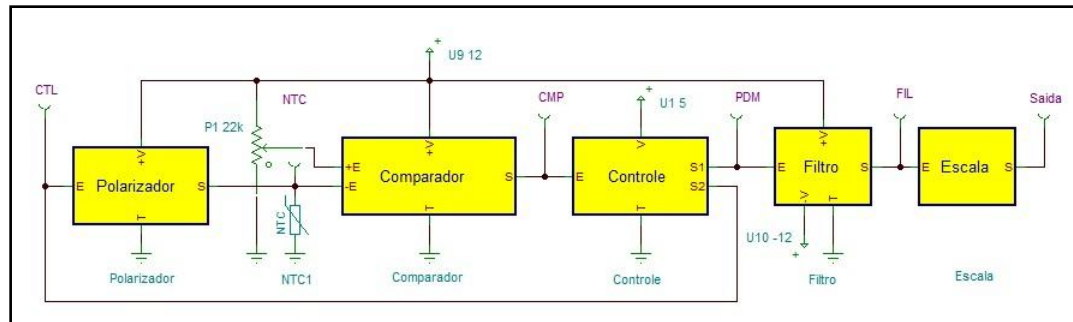
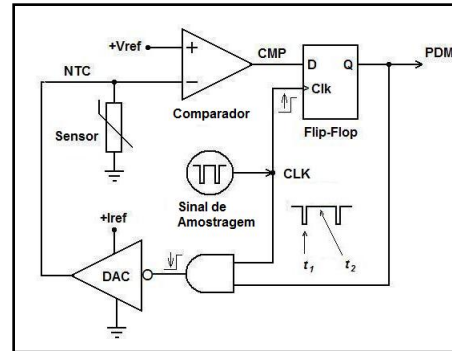
$$G_{th} \Delta T (\rho_t + 1) \left( 1 - \frac{\overline{pdm}}{\rho_t + 1} \right) + A_{th} H = G_{th}(T_s - T_a)$$

$$H = \frac{G_{th} \Delta T}{A_{th}} (\overline{pdm} - \overline{pdm}_2)$$

$$H = \frac{G_{th} \Delta T}{A_{th}} (\overline{pdm} - \overline{pdm}_2)$$

$$H_{max} = \frac{G_{th}}{A_{th}} (T_{max} - T_{a(max)})$$

# Implementação



**Diagrama geral em blocos do circuito Transdutor Sigma-Delta Termico.**

# Implementação

## Simulação e Implementação Analógica

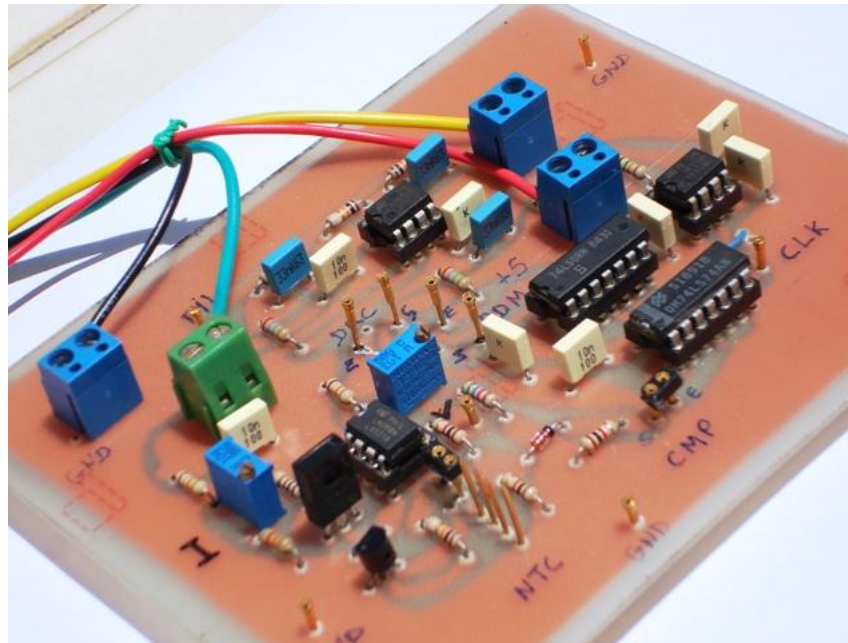
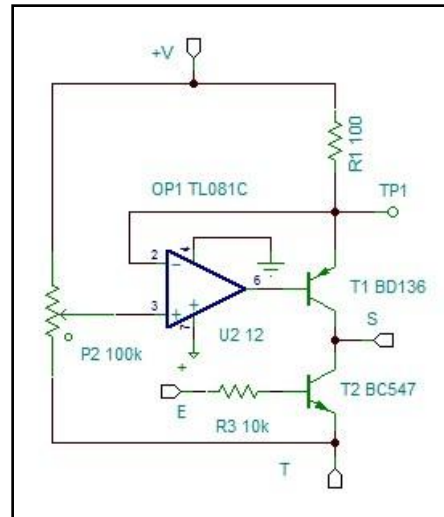


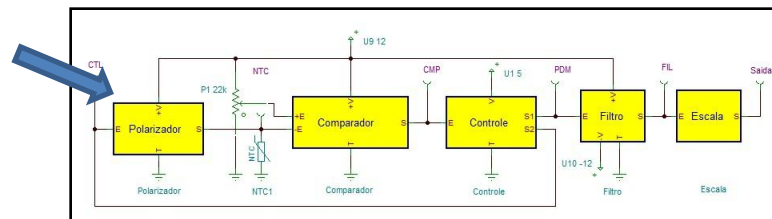
Foto do Protótipo usando Componentes Discretos.

# Implementação

## Simulação e Implementação Analógica

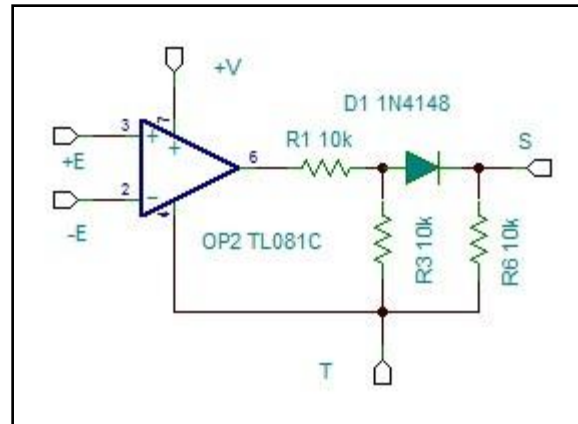


**Circuito do Polarizador.**

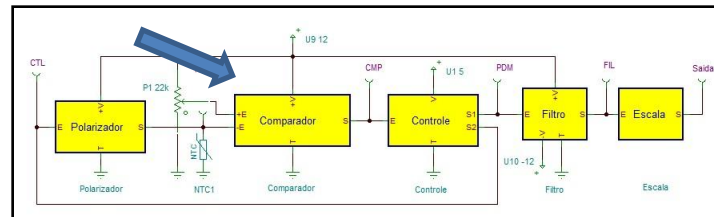


# Implementação

## Simulação e Implementação Analógica

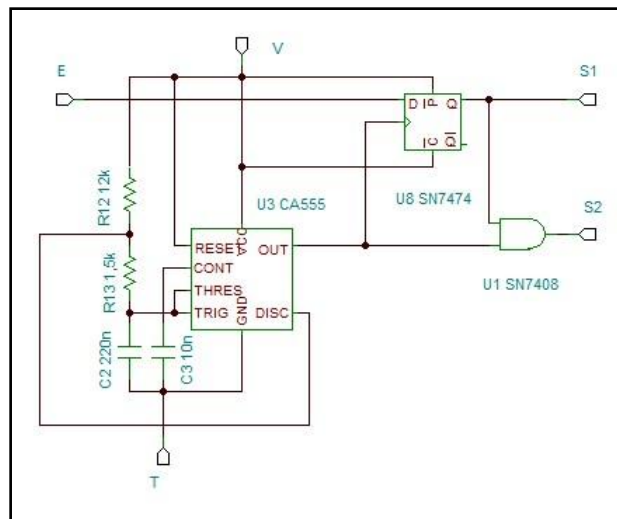


**Circuito Comparador**

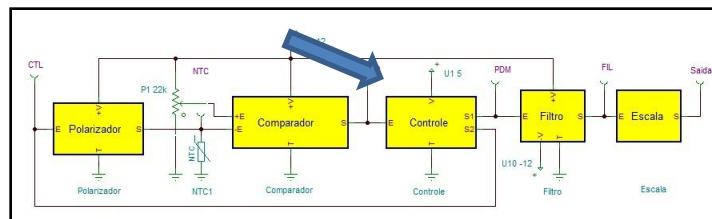


# Implementação

## Simulação e Implementação Analógica

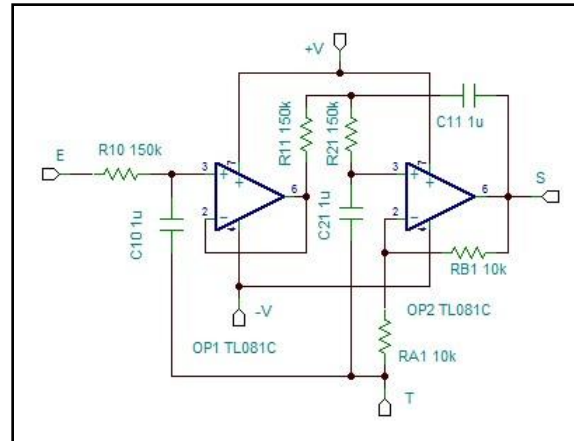


Circuito de Controle

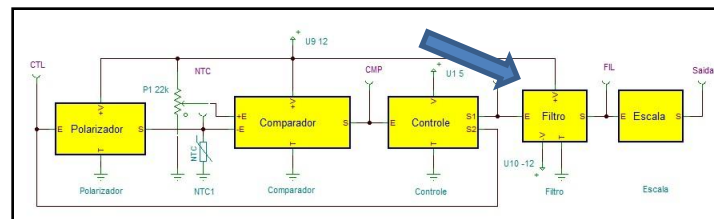


# Implementação

## Simulação e Implementação Analógica

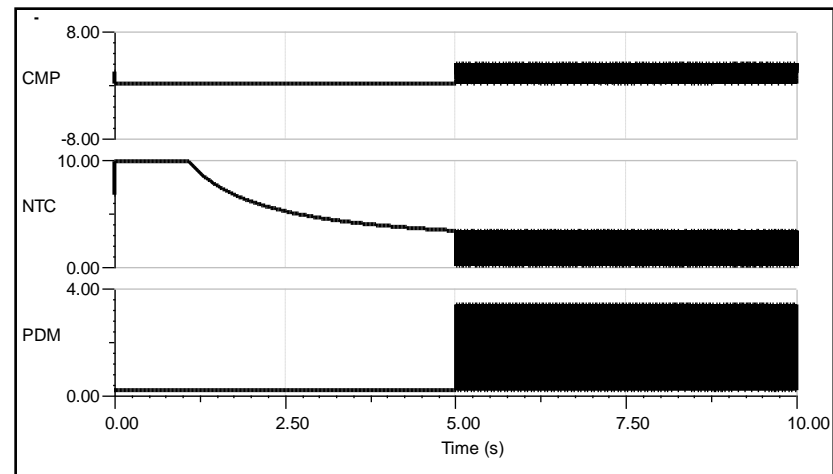


**Filtro Passa-Baixas analógico.**

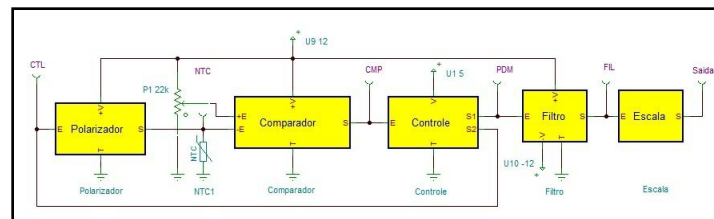


# Implementação

## Resultados

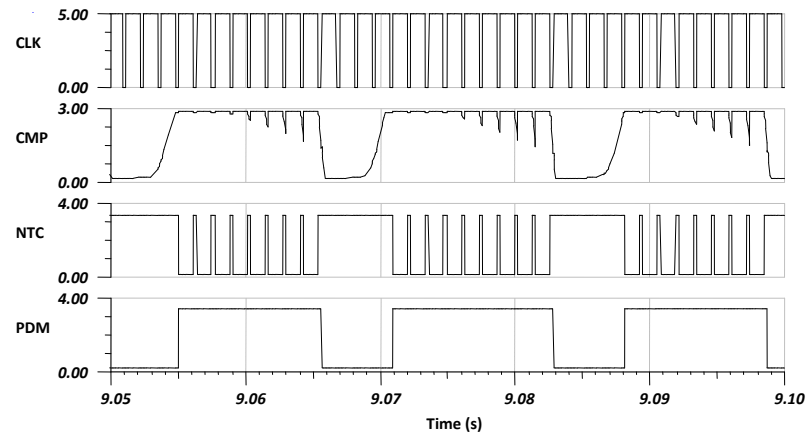


Transitórios do aquecimento inicial do sensor.

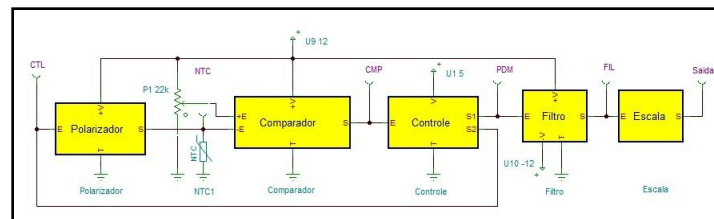


# Implementação

## Resultados



**Resfriamento e aquecimento do sensor em equilíbrio térmico.**



# Implementação

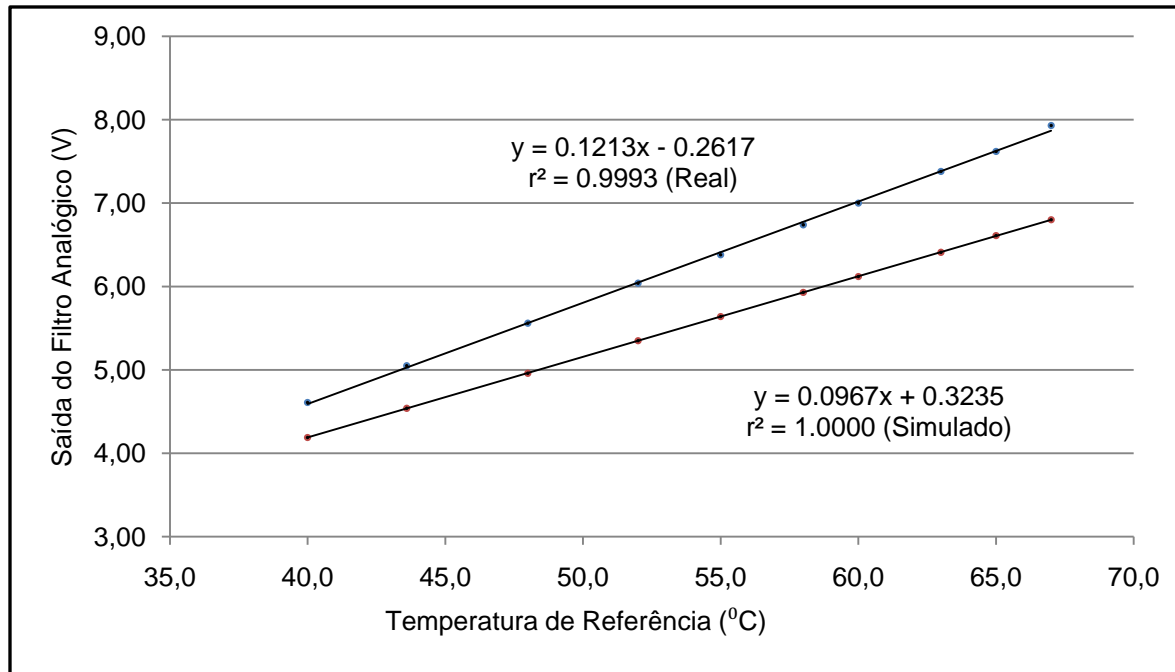
## Resultados

Condições de teste e valores obtidos sem DSP.

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores</i>		<i>Ref. (°C)</i>	<i>Analógico (V)</i>	<i>Simulado (V)</i>
$t_1$ (s)	0,000234		67,00	7,93	6,80
$t_2$ (s)	0,001090		65,00	7,62	6,61
$F_s$ (Hz)	755,29		63,00	7,38	6,41
$t_1/t_2$ (%)	21,47		60,00	7,00	6,12
$R_{s0}$ ( $\Omega$ )	163,3		58,00	6,74	5,93
$T_{min}$ (°C)	0,00		55,00	6,38	5,64
$T_{max}$ (°C)	68,60		52,00	6,04	5,35
$\Delta T$ (°C)	68,60		48,00	5,56	4,96
$V_{ref}$ (V)	3,38		43,60	5,05	4,54
$I_{ref}$ (mA)	20,72		40,00	4,61	4,19

# Implementação

## Resultados



**Linearidade Obtida com o Circuito Discreto.**

# Implementação

## Condições de Teste

Características do sensor NTC:

$$A = 0,01366 \Omega$$

$$B = 3334 \text{ K}$$

$$C_{th} = 10,73 \text{ mJ/K}$$

$$G_{th} = 0,841 \text{ mW/K}$$

Faixa da temperatura ambiente:

$$T_{min} = 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{max} = 68,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ponto de operação do sensor:

$$T_{s0} = 83,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{s0} = 163,3 \Omega$$

Frequência de amostragem:

$$F_s = 755 \text{ Hz}$$

$$t_1/t_2 = 21,47\%$$

$$V_{ref} = 3,38 \text{ V}$$

$$I_{ref} = 20,72 \text{ mA}$$

Taxa de amostragem:

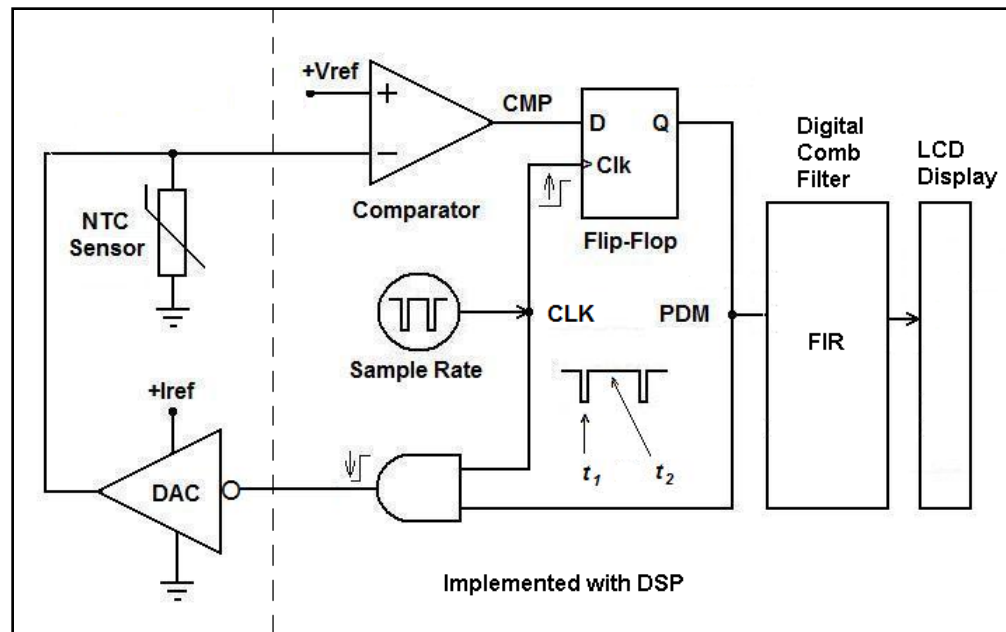
$$p_{sr} = 2,865 \text{ rad/s}$$

$$OSR = 755 / (2 * 0.456) = 827$$

SNR = 84,44 dB equivalente a um modulador convencional de 13 bits.

# Implementação

## Implementação Digital

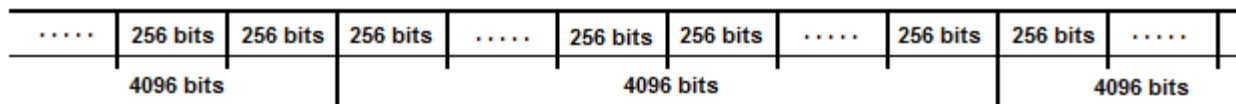


Transdutor Sigma-Delta térmico com Microcontrolador.

# Implementação

## Implementação Digital

- O comparador e o circuito de controle foi implementado por software, seguindo o seguinte pseudocódigo.
- *Início*  
*DAC=0; Atraso(tDac);*  
*Se NTC > Vref então PDM=0, Vá para Fim;*  
*Se NTC < Vref então DAC=1, PDM=1;*  
*End.*
- Na versão anterior, o valor médio deste trem de bits foi extraído diretamente do sinal *PDM* por um filtro analógico.
- Nesta versão o valor médio do trem de bits foi calculado matematicamente pelo microcontrolador.
- Foi realizada a cada 256 bits, uma média aritmética simples dos últimos 4096 bits, de tal forma que a cada 256 bits é gerada em tempo real uma amostra do sinal *PDM* com palavra de 12 bits, esta rotina pode ser observada em “Programas Fonte”, com o nome de *cpu\_timer0\_isr()* e este processo é conhecido como decimação.



Janela deslizante usada para decimação do sinal PDM.-

# Implementação

## Implementação Digital

- A cada amostra gerada foi calculada uma média ponderada das últimas 128 amostras com os ponderadores calculados segundo a janela de Blackman.
- Esta média ponderada é conhecida como filtro *FIR*.
- Cada amostra gerada pelo filtro *FIR* é ajustada para uma escala de temperatura cujo valor é mostrado num display de cristal líquido.

# Implementação

## Implementação Digital

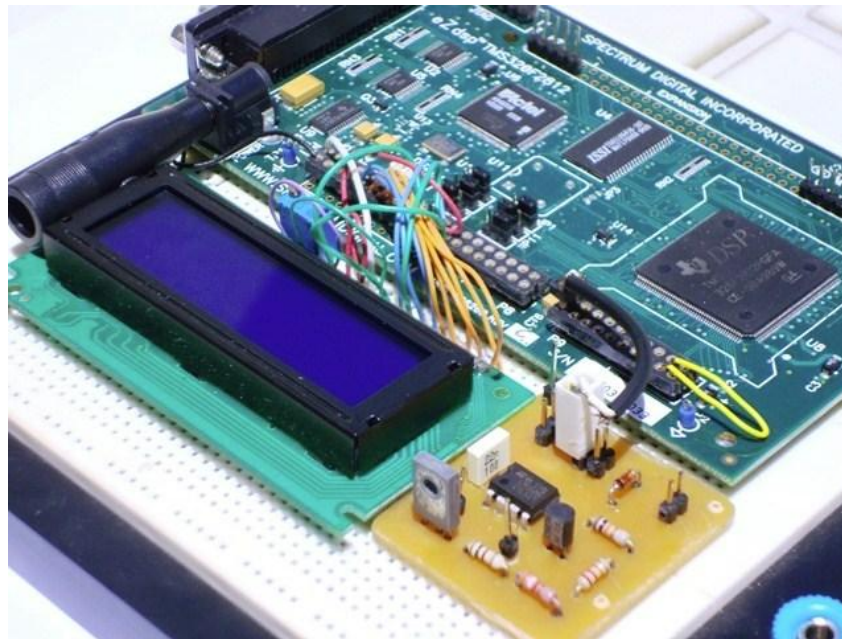


Foto do Protótipo com Microprocessador.

# Implementação

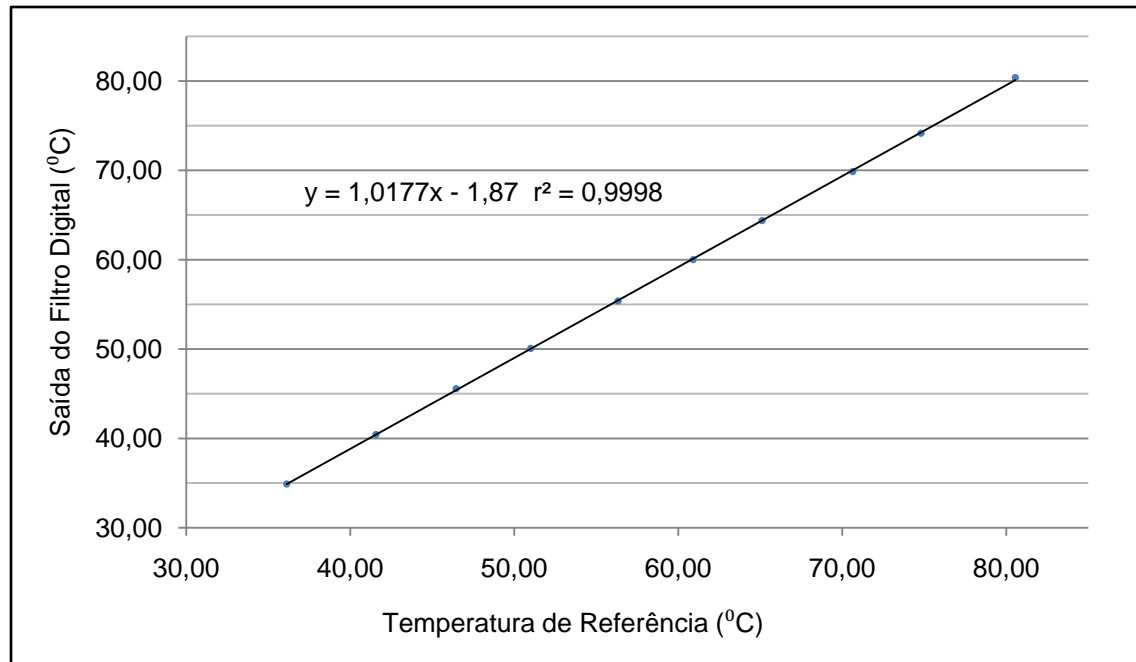
## Implementação Digital

Condições de teste e valores obtidos com DSP.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>		<b>Ref. (°C)</b>	<b>Digital (°C)</b>
$t_1$ (s)	0,0001		80,55	80,38
$t_2$ (s)	0,0009		74,80	74,15
$F_s$ (Hz)	1000		70,64	69,86
$t_1/t_2$ (%)	11,11		65,11	64,38
$R_{s0}$ ( $\Omega$ )	137,1		60,90	60,00
$T_{min}$ (°C)	26,00		56,33	55,38
$T_{max}$ (°C)	83,00		51,00	50,07
$\Delta T$ (°C)	57,00		46,45	45,56
$V_{ref}$ (V)	2,70		41,56	40,43
$I_{ref}$ (mA)	19,71		36,12	34,89

# Implementação

## Implementação Digital



**Linearidade Obtida com o Circuito Integrado num DSP.**

# Implementação

## Condições de Teste

Características do sensor NTC:

$$A = 0,01366 \Omega$$

$$B = 3334 \text{ K}$$

$$C_{th} = 10,73 \text{ mJ/K}$$

$$G_{th} = 0,841 \text{ mW/K}$$

Faixa da temperatura ambiente:

$$T_{min} = 26,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{max} = 83,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ponto de operação do sensor:

$$T_{s0} = 89,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{s0} = 137,1 \Omega$$

Frequência de sobreamostragem:

$$F_s = 1000 \text{ Hz}$$

$$t_1/t_2 = 11,11\%$$

$$V_{ref} = 2,70 \text{ V}$$

$$I_{ref} = 19,71 \text{ mA}$$

Taxa de sobreamostragem:

$$p_{sr} = 2,381 \text{ rad/s}$$

$$OSR = 755 / (2 * 0,379) = 1319$$

SNR = 91,71 dB equivalente a um modulador convencional de 14 bits.

# Conclusões

- Foi apresentada uma arquitetura de circuito baseada na modulação do sigma-delta aplicada às medidas da temperatura ambiente e radiação térmica. Esta arquitetura de circuito pode ser estendida para medidas de velocidade de fluido.
- O circuito do transdutor térmico sigma-delta para aplicação em medição de temperatura ambiente foi implementado para validar esta arquitetura.
- O relação linear entre a temperatura ambiente e o valor médio do sinal na saída do transdutor sigma-delta térmico foi demonstrada teoricamente e experimentalmente.
- A metodologia para o cálculo da tensão da referência e da corrente de referência do sensor foi desenvolvida para toda a escala de temperatura suportada pelo sensor.
- A topologia do transdutor sigma-delta térmico aplicada à medida da radiação térmica foi desenvolvida, sendo mostrado que a relação entre a saída do transdutor e a radiação térmica medida também é linear em toda a faixa de medição.
- Os resultados experimentais mostram que a resposta do circuito é linear com a variável a ser medida, estando assim de acordo com os resultados da simulação e da teoria desenvolvida para medição de temperatura ambiente.
- Esta arquitetura, baseada na modulação do sigma-delta, tem a vantagem de transformar a grandeza física diretamente na forma digital, sem a necessidade de passá-la por uma tensão ou corrente intermediária.
- A parte analógica desta arquitetura é fácil de implementar em circuito integrado porque está reduzida ao circuito de polarização do sensor e a um comparador.
- Uma desvantagem desta arquitetura é o alto consumo de energia do circuito para manter o sensor a uma temperatura constante acima da temperatura máxima a ser medida, principalmente para grandes faixas de temperatura.

# Trabalhos Futuros

- Implementação física da topologia aqui apresentada para medição de radiação térmica, para ratificar a linearidade esperada.
- Pesquisa e implementação de arquiteturas sigma-delta de ordem superior, analisado seu impacto na resolução e na resposta em frequência do transdutor.
- Implementação do transdutor sigma-delta para medição de radiação térmica, num circuito integrado misto, inclusive o sensor.-

# perguntas

# Bibliografia

- A. Oliveira, G. S. Deep, A. M. N. Lima, R. C. S. Freire, "A Feedback I<sup>2</sup>-controlled Constant Temperature Solar Radiation Meter", *Proc. IEEE-IMTC*, vol. 2, pp. 1062-1066 (1998).
- H. Fujita, T. Ohhashi, M. Asakura, M. Yamada, K. Watanabe, "A thermistor Anemometer for Low-Flow-Rate Measurements", *IEEE Trans. Instrum. Measurement*, 44 (3), pp. 779-782 (1998).
- L. S. Palma, A. Oliveira, A. S. Costa, A. Q. Andrade Jr., C. V. R. Almeida, M. E. P.V. Zurita, R. C. S. Freire, "Implementation of a Feedback I<sup>2</sup>-controlled Constant Temperature Environment Temperature Meter", *Sensors* 3 (10), pp 498-503 (2003).
- P. C. Lobo, "An electrically Compensated Radiometer", *Solar Energy*, 36 (3) pp.207-216 (1985).
- K. A. A. Makinwa, J. H. Huijsing, "Constant power Operation of a Two-dimensional Flow Sensor using Thermal Sigma-Delta Modulation Techniques", *Proc. IEEE-IMTC*, pp. 1577-1580 (2001).
- P. M. Aziz, H. V. Sorensen, J. V. D. Spiegel, "An Overview of Sigma-Delta Converters", *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 61-81 (1996).
- A. Oliveira, L. S. Palma, A. S. Costa, R. C. S. Freire, A. C. C. Lima, "A Constant Temperature Operation Thermoresistive Sigma-Delta Solar Radiometer", *Measurement*, (34) pp 267-273 (2006).
- L.S. Palma, A. Oliveira, R. C. S. Freire, A. B. Fontes, "Sigma-Delta Modulator: with Themoresistive Sensor Frequency Response", *Proc. IEEE-IMTC*, pp. 776-780, (2006).
- Texas Instruments Incorporated, TMS320C28xx User's Guide, (2001).
- IFEACHOR, E. C., JERVIS, B. W., *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. Suffolk: Addison-Wesley Publishers, Ltd., 2002, 2nd edition, Chapter 7, pp. 343-454.
- Amauri Oliveira. Sensores Termo-resistivos em Configurações Realimentadas. 1997 111f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba. Orientadores: Gurdip Singh Deep e Raimundo Carlos Silvério Freire
- Lígia Souza Palma. Modulador Sigma-Delta com Sensor Termo-resistivo. 2005. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Orientadores: Dr. Raimundo Carlos S. Freire e Dr. Amauri Oliveira.
- Alexandre Santana da Costa. Transdutor Sigma-Delta com Sensor Termo-Resistivo. 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Bahia. Orientadores: Dr. Amauri Oliveira e PhD. Antonio Cezar de Castro Lima.
- Engineering Notes. Spectrum Sensors & Controls Inc., <http://www.specsensors.com/ptc-engineering.asp>, <http://www.specsensors.com/ntc-engineering.asp>
- Contadini, Franco., Demystifying Sigma Delta ADCs., Artigo publicado na Sensors Magazine, Agosto de 2002, [http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote\\_number/1870/ln/en](http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/1870/ln/en)
- Park, Sangil, Principles of Sigma-Delta Modulation for Analog-to-Digital Converters, Abril de 1998.
- Valter C. Rosa, Lígia Souza Palma, Amauri Oliveira, Tiago Rodrigues Torres. "An inherently linear transducer using thermistor, Practical approach." 3rd International Conference on Sensing Technology, Nov.30 -Dec.3, 2008, Tainan, Taiwan.
- John Bishop, Bruce Trump, R. Mark Stitt. "FilterPro MFB and Sallen-Key Low-Pass Filter Design Program", Application Report Texas Instruments, SBFA001A – November 2001
- I.S. Steinhart & S.R. Hart "Deep Sea Research" vol. 15 p. 497 (1968).
- Valter C. Rosa, Lígia Souza Palma, Amauri Oliveira, Luiz Fernando G. T. Amaral. "An inherently linear transducer using thermal sigma-delta modulator." XIX IMEKO World Congress, Fundamental and Applied Metrology, September 6-11, 2009, Lisbon, Portugal (Artigo submetido em fevereiro de 2009, aguardando aceitação para publicação)
- Tina for Windows, "The Complete Electronics Lab." Student Version 7.0.80.15 SV-DS, by DesignSoft, Inc. 1993-2008.
- Graça Martins, M.E, "Introdução às Probabilidades e Estatística", Sociedade Portuguesa de Estatística(2005)

# Programas Fonte

- // -----
- // Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica
- // Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica
- // Valter da Conceição Rosa – valter.rosa@gmail.com
- // Agosto de 2008
- // Programa desenvolvido para o microcontrolador TMS320F2812
- // -----
- // Descrição: Executa as funções do Comparador, Controle, Filtro e
- // Escala do Transdutor Sigma-Delta Térmico.
- // -----
- // Principais variáveis:
- // OSR: Número de bits do sinal PDM em cada amostra é gerada.
- // tDac: Tempo de espera para a estabilização da saída do comparador.
- // Pfila: Ponteiro de entrada e saída da fila circular.
- // Vfila: Fila circular que armazena os últimos 16 pacotes de 256 bits.
- // Pdm1: Amostras do sinal PDM geradas pelo processo de decimação.
- // MaxFila: Número máximo de posições da fila.
- // Pdm3: Amostras do sinal PDM geradas pelo filtro FIR.
- // Pdm: Mais antigos OSR bits da última amostra Pdm1 gerada.
- // Pdm0: Mais recentes OSR bits, que fará parte da nova amostra.
- // Pdmf: Cópia de Pdm.
- // indc: Contador dos bits gerados.
- // MaxBit: Número máximo de bits acumulados em cada amostra.
- // Bit: Bit gerado a cada leitura do sensor.
- // NTC: Tensão do sensor convertida internamente para uma palavra de 12 bits.
- // nVref: Valor de Vref em volts com 12 bits
- // Vref: Valor da tensão de referência do transdutor em volts.
- // Tmin: Valor da Temperatura mínima em graus Celsius.
- // dT: Valor da faixa de temperatura.
- // BufLcd: Buffer de armazenamento dos dados a serem mostrados no display.
- // -----

# Programas Fonte

```
• //-----  
• void delay_loop(end) // end=10us  
• {  
•     unsigned int i;  
•     for (i = 0; i < end; i++) {asm(" RPT #144 || NOP");}  
• }  
•  
• // Rotina primária de aquisição de dados que gera Pdm0 a cada OSR bits.  
• //-----  
• void Comb(void)  
• {  
•     GpioDataRegs.GPFDAT.bit.GPIOF6=0; // Gera sinal para o DAC  
•     delay_loop(tDac); // Aguarda a estabilização do sinal do comparador  
•     while (AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1== 0) {}  
•     asm(" RPT #11 || NOP");  
•     AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;  
•     NTC =((AdcRegs.ADCRESULT0>>4) ); // Lê a tensão do sensor pelo ADC  
•     if( NTC>nVref) Bit=0; // Executa a função do Comparador e Filp-Flop  
•     if( NTC<nVref) Bit=1;  
•     GpioDataRegs.GPFDAT.bit.GPIOF6=Bit; // Gera realimentação para o DAC  
•     Pdm0=Pdm0+Bit;           // Acumula OSR bits  
•     indc++;  
• }  
•
```

# Programas Fonte

```
• // Rotina que lê e grava na fila circular.
• // -----
• int Fila(void)
• {
•     Pdm=Vfila[Pfila]; // lê o valor mais antigo da fila
•     Vfila[Pfila]=Pdm0; // salva o valor atual na fila
•     Pfila--; // atualiza o ponteiro da fila
•     if (Pfila==0) Pfila=MaxFila; // torna a fila circular
•     return Pdm;
• }
•
• // Rotina que faz interface com a rotina do filtro FIR do Anexo I
• // -----
• int Filtro(void)
• {
•     fir.input=Pdm1; // Entrada de nova amostra vinda do decimador
•     fir.calc(&fir); // Cálculo da nova amostra filtrada
•     Pdm3=fir.output; // Saída da nova amostra
•     return Pdm3;
• }
•
• // Rotina executada na interrupção do relógio na frequência de amostragem.
• interrupt void cpu_timer0_isr(void)
• {
•     Comb(); // Acumula até OSR bits.
•     if(indc==OSR)
•     {
•         indc=0;
•         Pdmf=Fila(); // Retira a amostra mais antiga da fila e grava a mais nova
•         Pdm1=Pdm1-Pdmf+Pdm0; // Gera nova amostra a partir da anterior.
•         Pdm3=Filtro(); // Gera nova amostra filtrada pelo filtro FIR
•         Pdm0=0;
•     }
•     PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
• }
```

# Programas Fonte

```
• // Inicialização da rotina do filtro FIR
• // -----
• void InicFilt(void)
• {
•     fir.order=FIR_ORDER;
•     fir.dbuffer_ptr=dbuffer;
•     fir.coeff_ptr=(long *)coeff;
•     fir.init(&fir);
• }
•
•
• // Inicialização das variáveis do sistema, do filtro FIR e do display LCD.
• // -----
• void InicTsd(void)
• {
•     Tmin=26.0; dT=57.0; Vref=2.70;
•     tDac=10;      // 100 us
•     OSR=256;
•     nVref=4095*Vref/3;
•     MaxFila=16;
•     MaxBit=OSR*MaxFila; // 12 bits
•     DelayLcd=200;      // 2ms
•     for(ind=0;ind<=MaxFila;ind++) Vfila[ind]=0;
•     Pfila=MaxFila;
•     Bit=0; Pdm0=0; Pdm1=0;
•     InicFilt();
•     InicLcd();
• }
•
• // Rotina que executa a função de Escala
• // -----
• void Escala()
• {
•     ltp=sprintf (BufLcd, "%+4.1f C ", Tmin+(float)Pdm3*dT/MaxBit);
•     BufLcd[ltp-4]=0xDF;
• }
```

# Programas Fonte

```
• // Programa principal, única parte do sistema fora da interrupção do relógio.  
• void main(void)  
• {  
•     InicAll();           // Inicializa todo o sistema  
•     while(1)           // Loop infinito  
•     {  
•         Escala();       // Formata a linha da saída para display.  
•         Display(0xC0);  // Escreve o valor da temperatura no display  
•     }  
• }  
• // FIM
```