

Sensor Integrado de Temperatura

André Martins Pio de Mattos e Gustavo Simas da Silva

Engenharia Eletrônica | DEEL | Centro Tecnológico



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA

Sumário

Contexto

Requisitos Gerais e Desafios

Diagrama Funcional

Circuito Desenvolvido

Análise

Revisão de Requisitos Propostos

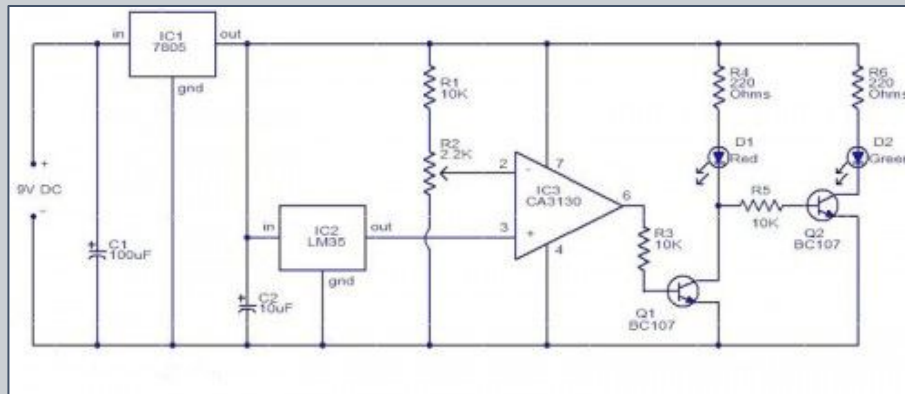
Considerações

Referências

Contexto

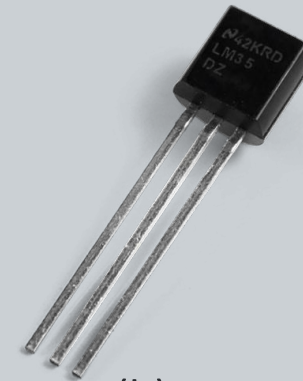
Sensores de temperatura integrados são transdutores lineares que transformam um valor de temperatura em respectivo sinal elétrico, o qual é interpretado pelo sistema e, por ventura, exibido para o usuário.

São utilizados em todo tipo de sistema que necessite efetuar o controle de variáveis, tendo a temperatura como parâmetro moderador. Estima-se que o mercado atual [5], com fabricantes como Analog Devices, Texas Instruments e Microchip, tenha receita de US\$5,62bi em vendas de sensores integrados (dados de 2018).



(a)

Diagrama de sensor integrado LM35



(b)

LM35 em seu encapsulamento comercial

Requisitos Gerais e Desafios

Algumas características propostas no projeto:

Utilização de transistores MOS para o Bandgap proposto;

Geração de própria tensão de referência (V_{ref});

Precisão de valor medido de temperatura em $0,5^{\circ}\text{C}$;

Intervalo de medição de temperatura de -25 a 100°C

Consumo médio do circuito de Bandgap em torno de $10\mu\text{W}$;

Conversão A/D com amplificadores operacionais reais;

Sistema em malha fechada com circuito realimentado;

Simulação de características e resultados do circuito em software especializado (LTSPICE).

Alguns possíveis desafios do projeto:

Projetar controlador para realimentação do sistema;

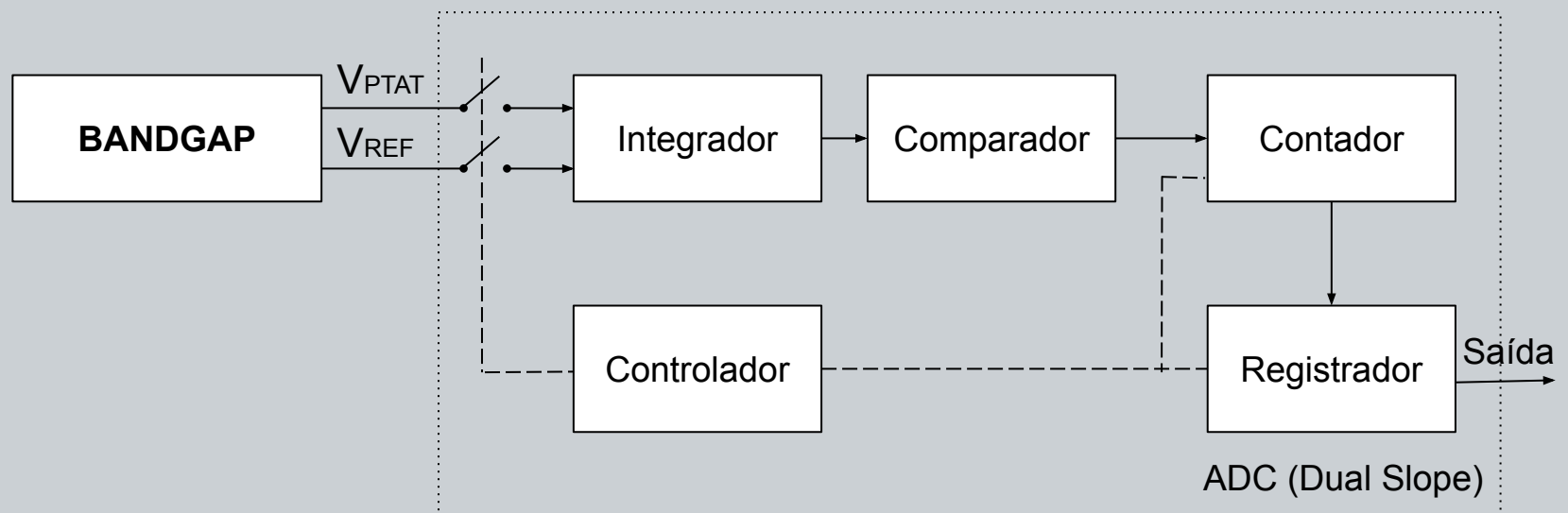
Dimensionar o parâmetros do conversor A/D;

Utilizar tensões e variações pequenas (V_{PTAT} , ΔV_{PTAT} e V_{SUPPLY});

Propiciar robustez e garantia de precisão.

Diagrama Funcional

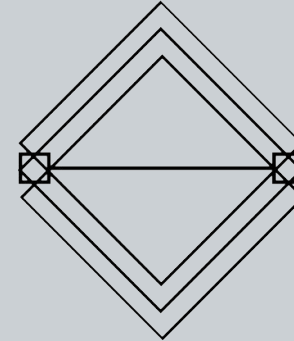
O diagrama abaixo mostra a nível funcional o sistema desenvolvido, que é composto de 6 blocos: circuito de tensão de bandgap, conversor analógico-digital de rampa dupla (integrador, comparador), um controlador para gerenciar as chaves, além do contador e do registrador. Vale ressaltar que a saída é um sinal discreto em amplitude e, para o escopo do projeto, o ponto de interesse do sistema é a saída do contador.



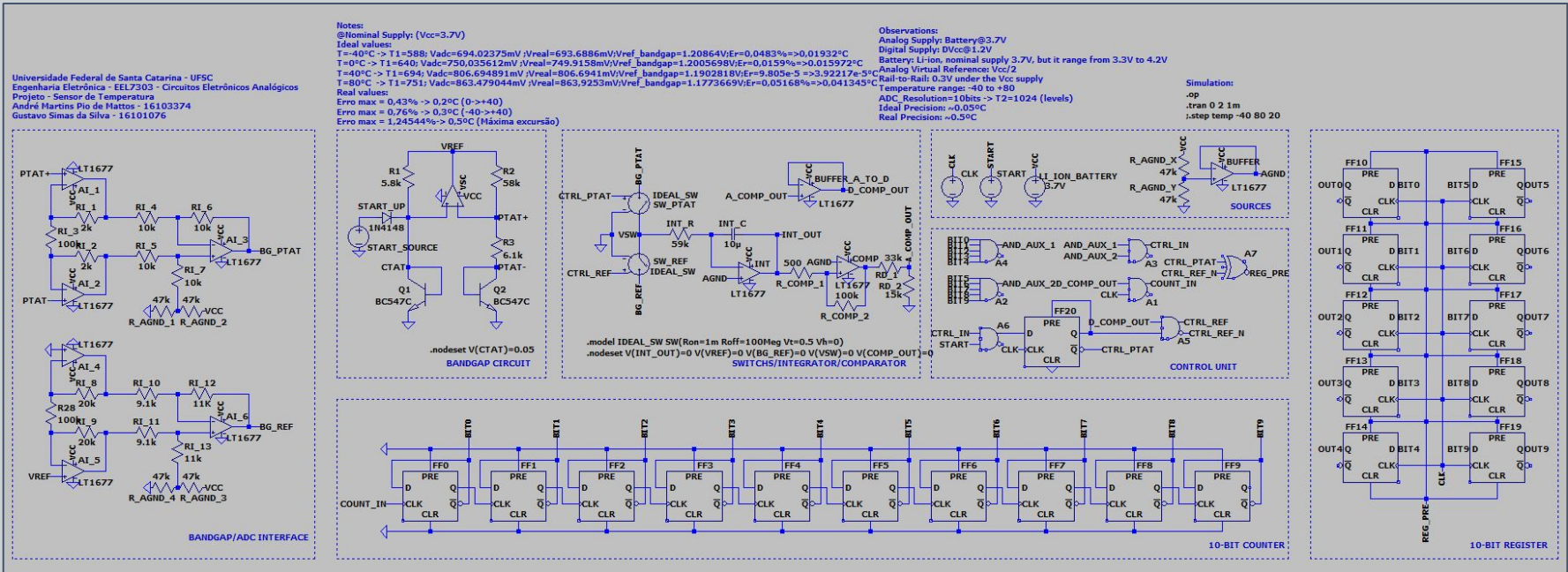
Circuito Desenvolvido

Circuito desenvolvido (RS7303) conta com:

- 10 opamps (LT1677)
- 1 capacitor (10uF)
- 2 BJT (NPN - BC547C)
- 28 resistores
- 1 diodo (startup bandgap)
- 21 Flip-Flops Tipo-D



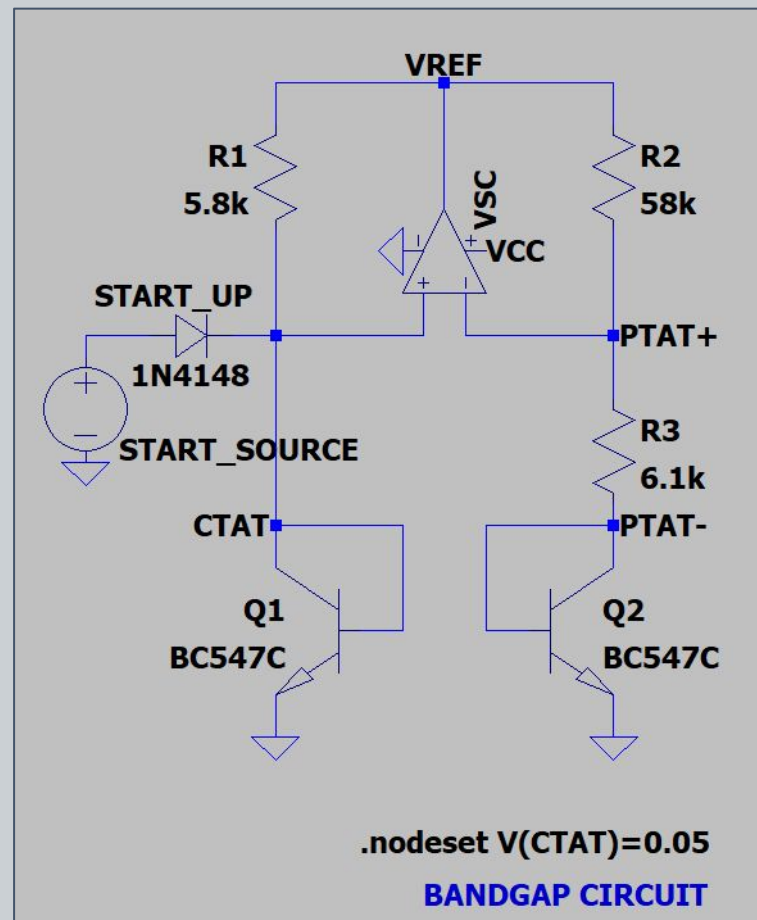
REGULAR SYSTEMS



Bloco Circuito Bandgap

O Circuito de Referência Bandgap desenvolvido é baseado na topologia de Brokaw, descrita em [1]. O bloco utiliza-se de transistores BJT NPN modelo BC547C e suas respectivas variações de tensão em VBE devido à temperatura, de forma a gerar um cancelamento do termo decrescente complementar VCTAT. O sinal VPTAT (o qual se dá como VPTAT+ - VPTAT-) é diretamente proporcional à temperatura e apresenta variação linear. Adiciona-se o mecanismo de startup com excitação de tensão inicial em 0,05V no nó CTAT, realizada por diretiva do software (nodeset). Os resistores foram escolhidos de forma que a corrente em R1 seja 10 vezes maior que em R2. Com Q1 = Q2, é possível mostrar que:

$$V_{REF} = V_{BE1} + R1 \cdot I1 = V_{BE1} + (R2/R3) \cdot (kT/q) \cdot \ln(R2/R1)$$

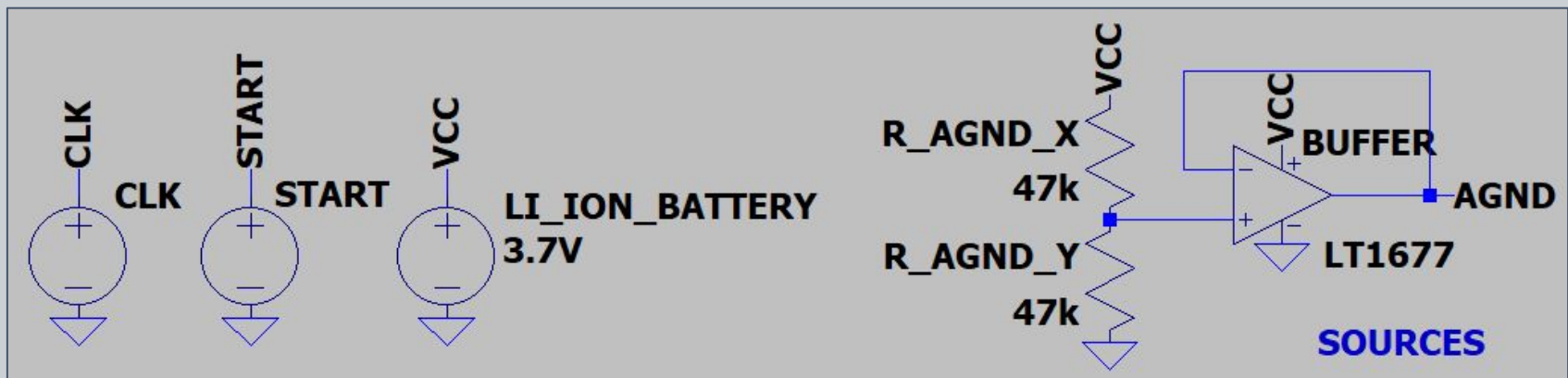


Bloco de Alimentação

O Bloco de Alimentação é composto pelas fontes de tensão necessárias tanto para a parte analógica, quanto para a digital. Foram utilizadas fontes para o clock dos flip-flops, tensão inicial no circuito de startup, além de alimentação principal (suposta como bateria de Ion-Lítion com valor nominal de 3,7V).

Em relação à alimentação principal da bateria, foi adicionada uma estrutura com divisão de tensão e buffer para prover referência simétrica aos blocos analógicos, conforme ilustrado.

Em simulação, as fontes não variam com temperatura (elementos ideais). Porém foram realizados testes considerando limite inferior (3,3V) e superior (4,2V) de tensão.

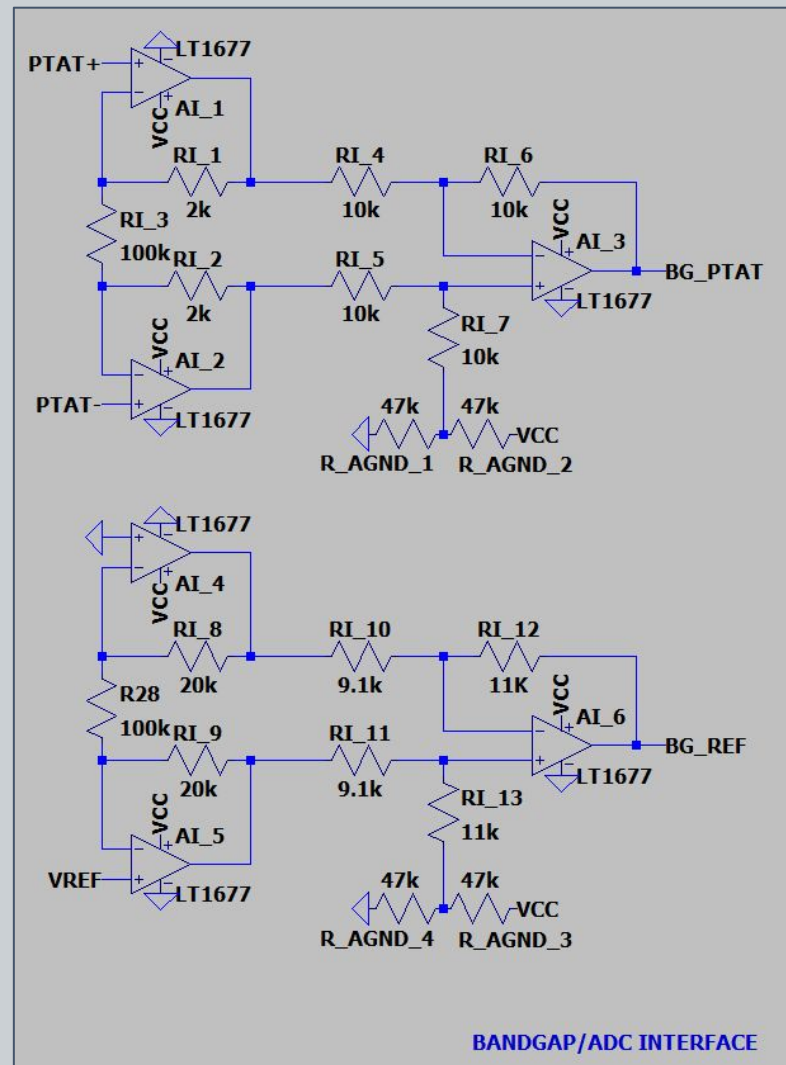


Bloco Interface Bandgap/ADC

O circuito de Interface Bandgap/ADC é utilizado para se processar os sinais desenvolvidos no bloco da referência de Bandgap e disponibilizá-los ao Conversor Analógico-Digital. Para isso foram projetados dois amplificadores de instrumentação para tratar dos sinais V_{PTAT+} , V_{PTAT-} e V_{REF} .

Com isso é possível obter os sinais V_{BG_REF} e V_{BG_PTAT} respectivamente com ganhos 2,8 e -18,92 em relação a V_{REF} e V_{PTAT} . $V_{REF} = 1,09V$ (@20°C).

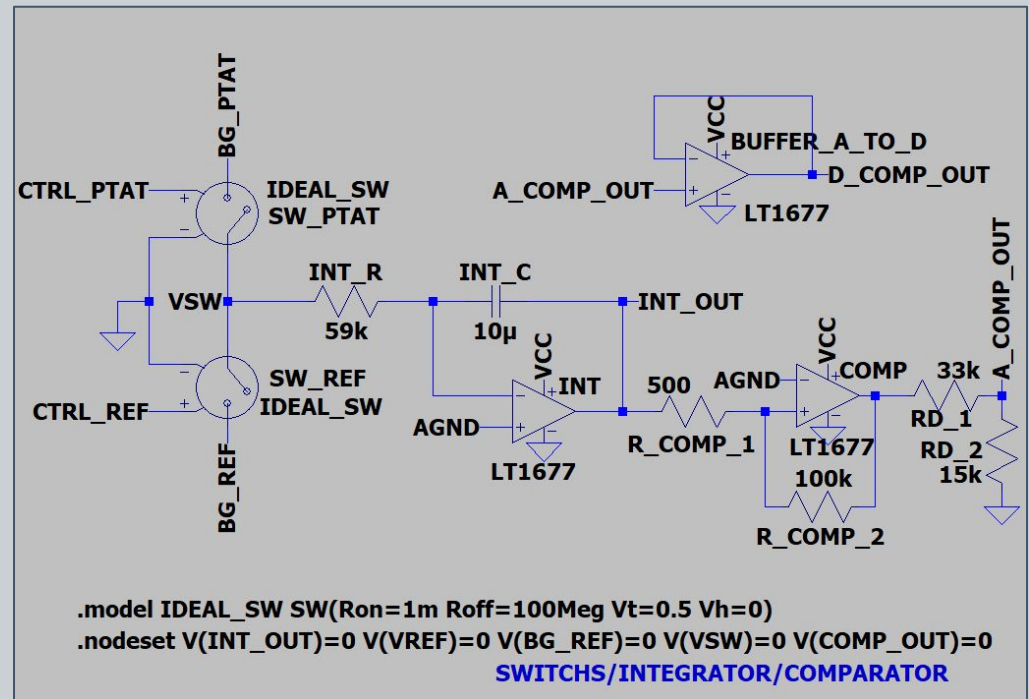
Considera-se que foram utilizados mecanismos similares de tratamento dos sinais V_{REF} e V_{PTAT} para garantir simetria, além de aproveitar a topologia desenvolvida para o bloco.



Bloco ADC

O Bloco Conversor Analógico-Digital (ADC) é composto por um amplificador integrador inversor de Miller, chaves ideais e um comparador Schmitt-Trigger (histerese).

Dispõe-se de diretivas .nodeset do simulador LTSPICE para aplicar um estado inicial a nós relevantes do sistema. Também, há a diretiva para os parâmetros básicos da chave.

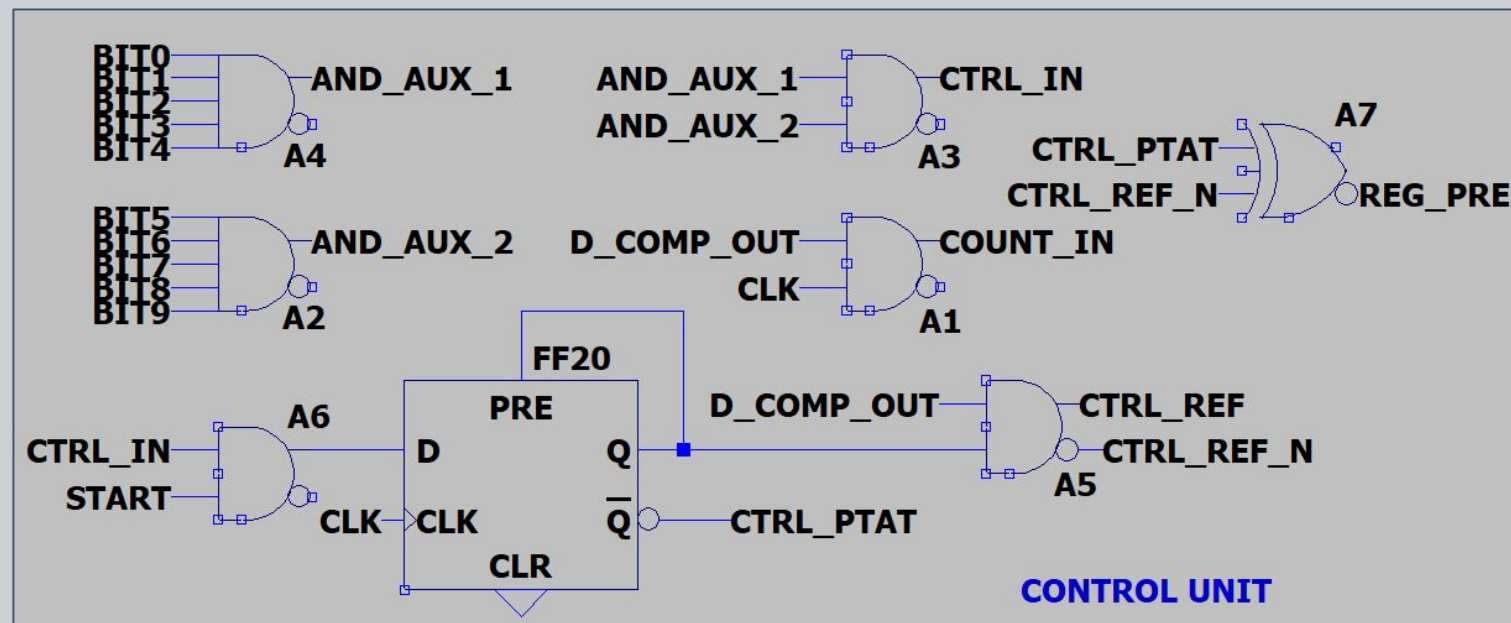


É inserido, da mesma forma, um amplificador LT1677 para atuar como buffer de alimentação entre parte analógica e digital, conforme ilustrado. Para o integrador, é possível mostrar que a função de transferência é:

$$H(s) = V_{O(s)} / V_{I(s)} = -1/sCR$$

Bloco Unidade de Controle

A Unidade de Controle (UC) é responsável por disponibilizar sinais de comando para os demais blocos do sistema, fechando a malha geral e tornando o sistema realimentado. Utiliza de portas lógicas AND, NAND e Flip-Flops Tipo D. Simplificadamente, os Flip-Flops guardam valores de estado, que determinam a etapa de funcionamento do ADC. Existem três estados possíveis, S_IN(sinal de entrada para o integrador), S_REF(sinal de referência para o integrador) e S_OFF(quando se termina a execução). A lógica combinacional recebe condições de transição do circuito e, por consequência, atualiza o estado vigente.

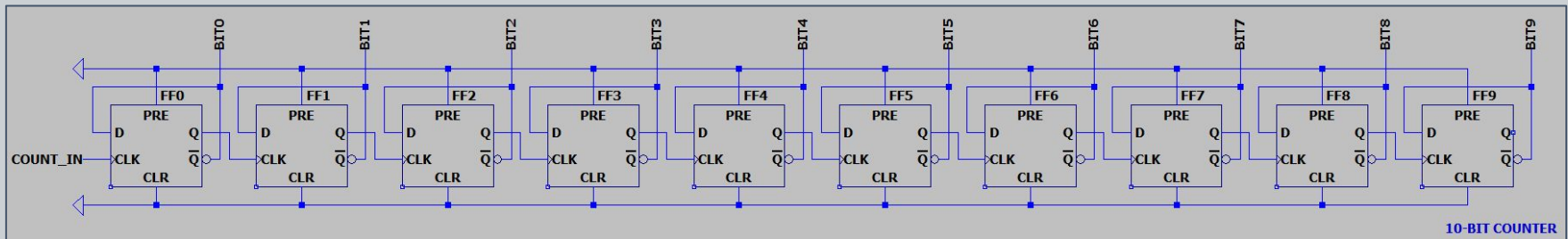
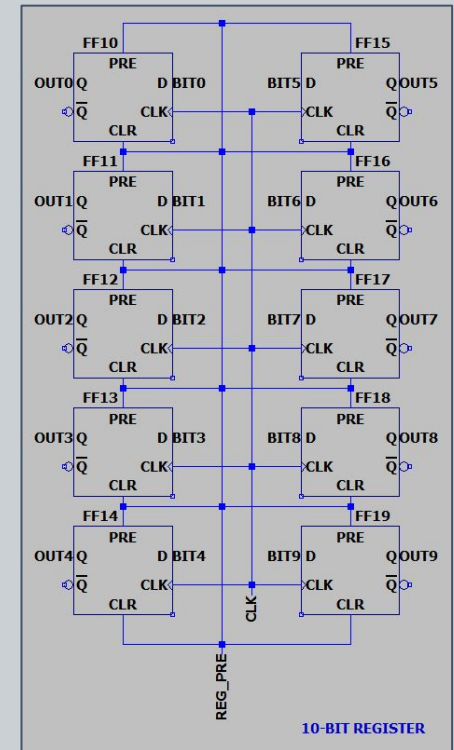


Blocos Contador e Registradores

Os Blocos de Contador e Registradores têm como função, respectivamente, utilizar de um sinal de controle proveniente do Bloco Unidade de Controle para, então, efetuar a contagem binária (representação da temperatura) e posteriormente registrar os valores.

Para tal, são utilizados 10 Flip-Flops Tipo D para a representação em 10 bits. Os Flip-Flops atuam de forma assíncrona no Contador e de maneira síncrona no Bloco Registrador, possuindo tempo de subida (T_{RISE}) e descida (T_{FALL}) de $10\mu s$ e tempo de atraso (delay - T_D) em $5\mu s$

Os sinais de bit são enviados também à UC para realimentação e verificação de estado para conseguinte atuação nas chaves presentes no Bloco Conversor A/D.



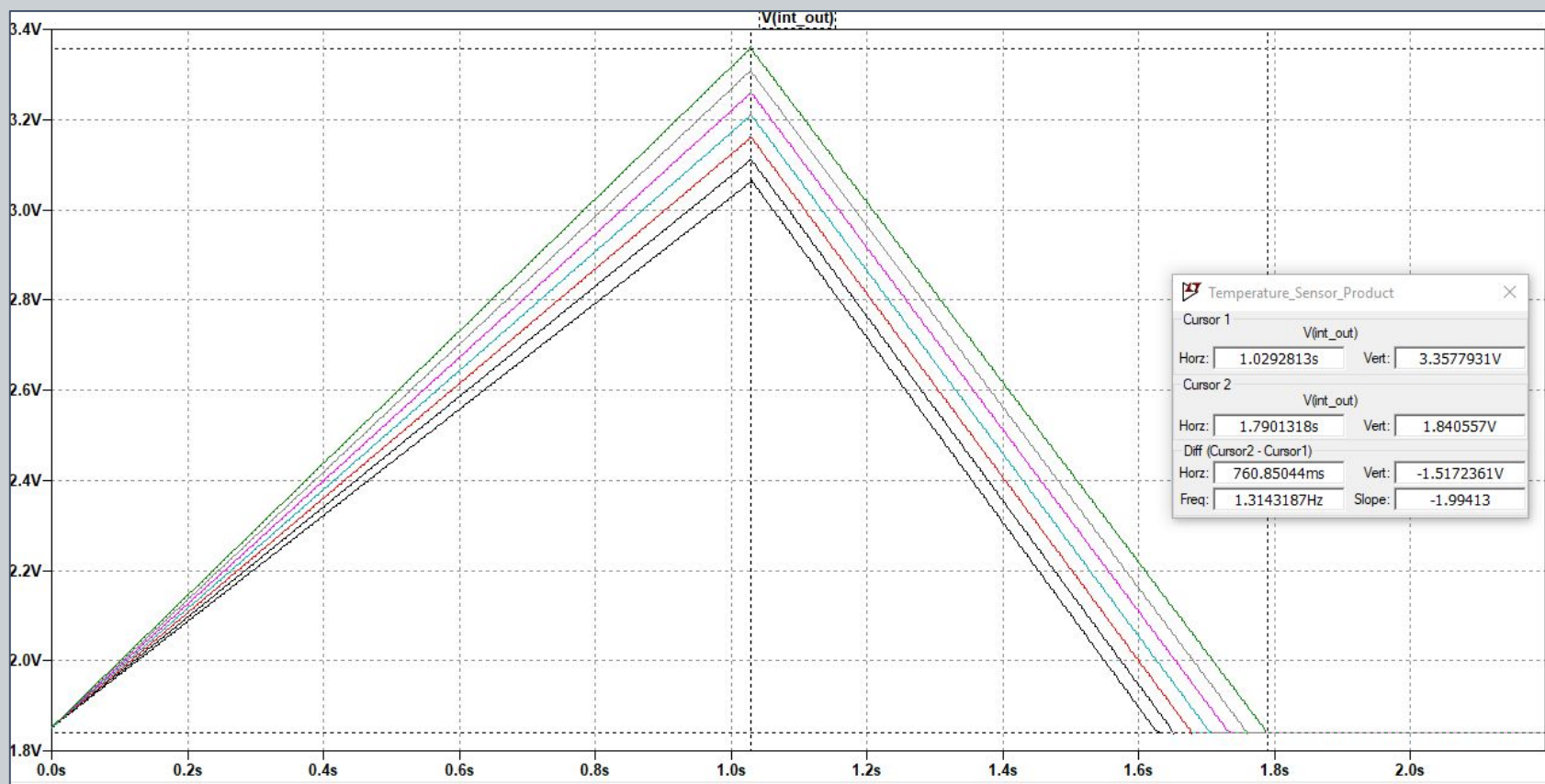
Análise - Ampop LT1677

O amplificador operacional utilizado é o LT1677 da fabricante Linear Technology [6]. O componente é de baixo ruído, rail-to-rail, e apresenta as seguintes especificações:

Ampop LT1677	
Alimentação	$\pm 3V$ a $\pm 18V$
Offset máximo	$60\mu V$
Corrente de Bias máxima	$20nA$
Produto Ganho-Banda (GBW)	$7,2MHz$
Slew Rate típico	$2,5V/\mu s$
Faixa de Temperatura operacional	$-40^{\circ}C$ a $+85^{\circ}C$
CMRR	$130dB$

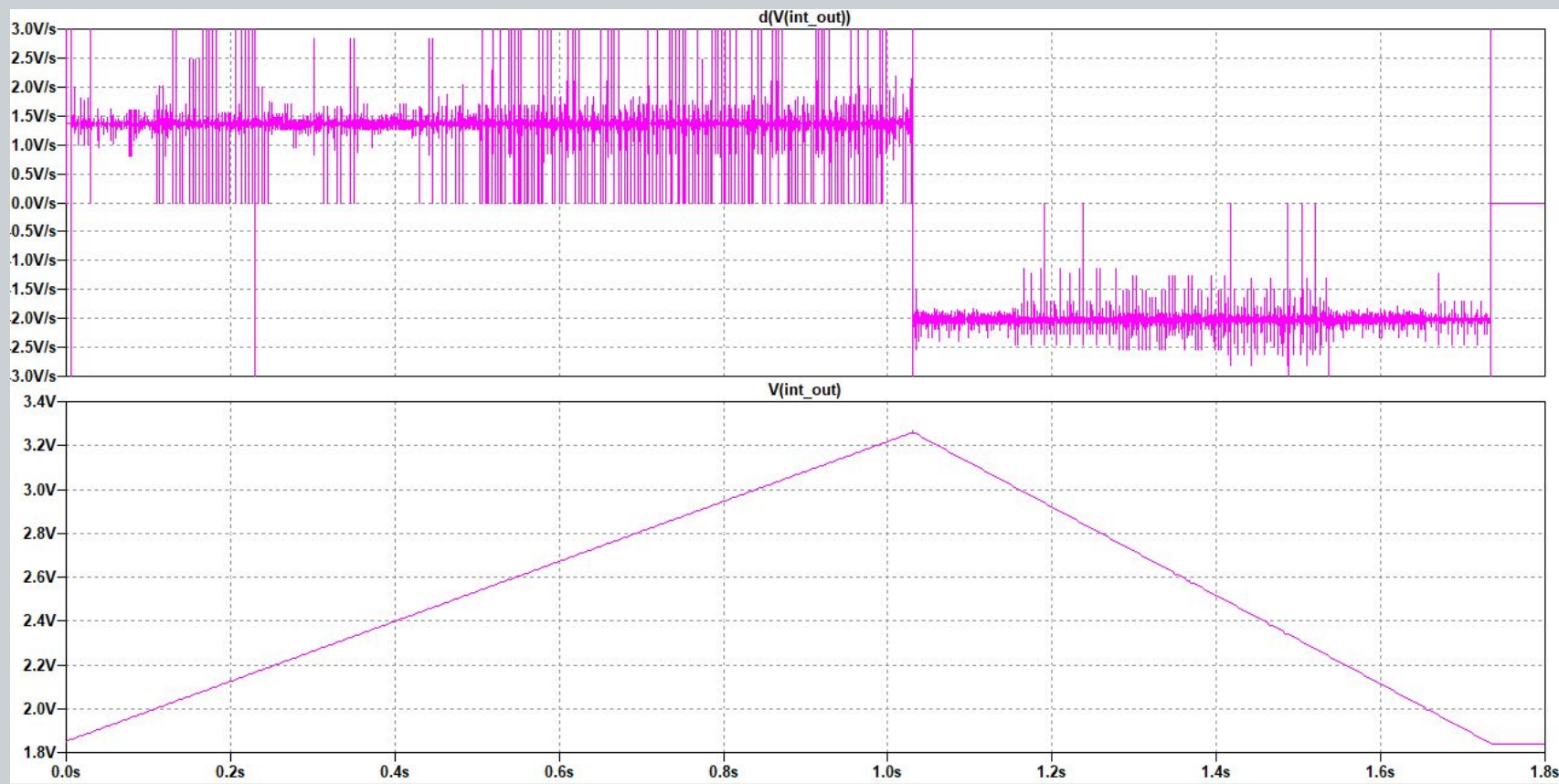
Análise - Integrador

O gráfico abaixo apresenta os sinais de saída do integrador para as diferentes temperaturas simuladas (de -40°C a $+80^{\circ}\text{C}$). Percebe-se que o tempo de descida para a temperatura máxima operacional é de aproximadamente 761ms, o que representa cerca de 42% do tempo total de medida.



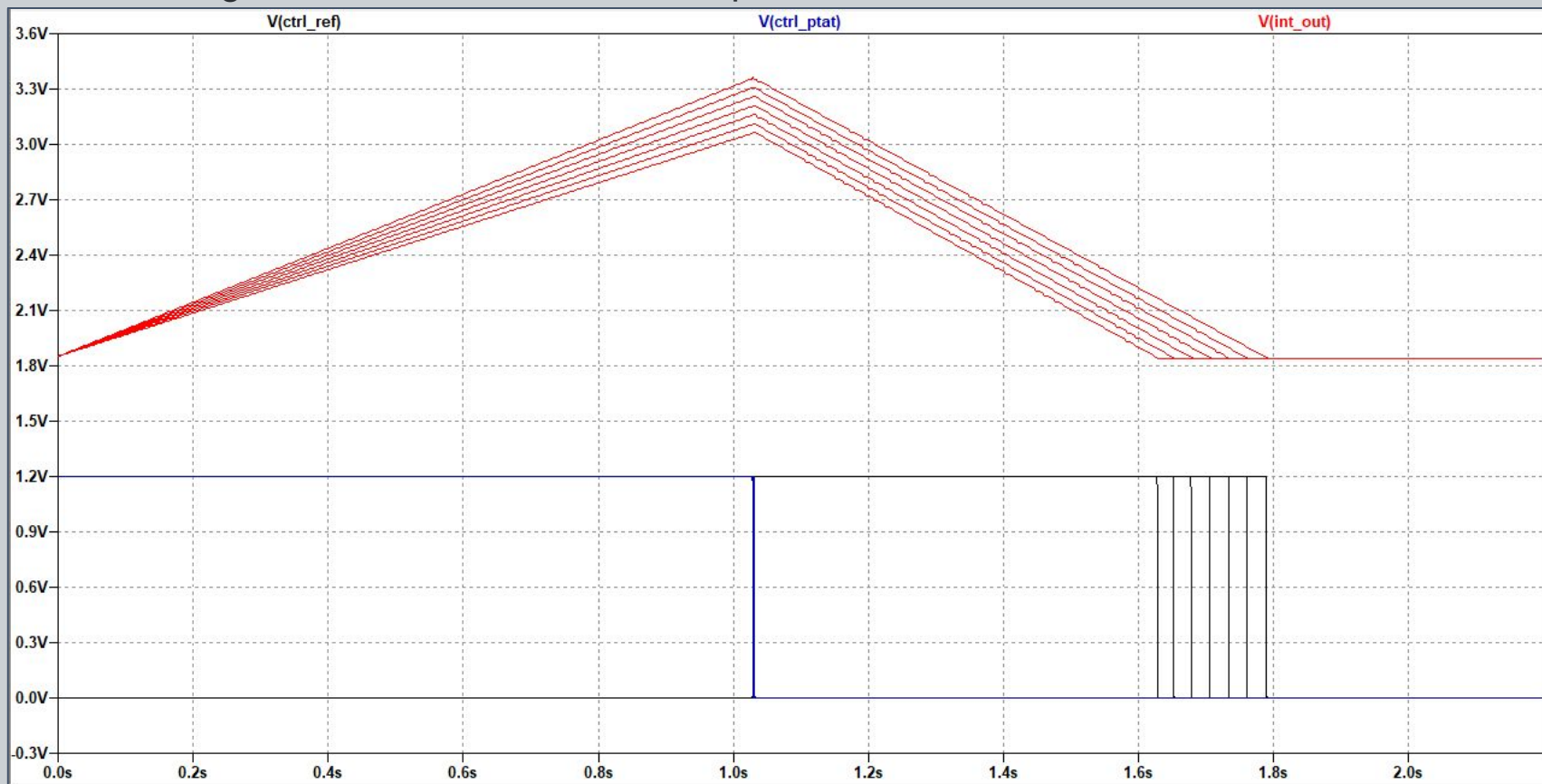
Análise - Linearidade

A linearidade foi verificada ao se operar com a derivada primeira do sinal. Como se observa pelo gráfico a seguir, o sinal apresenta boa linearidade. Os picos de alta amplitude são, em parte, devido ao tempo de captura (timestep) do simulador.



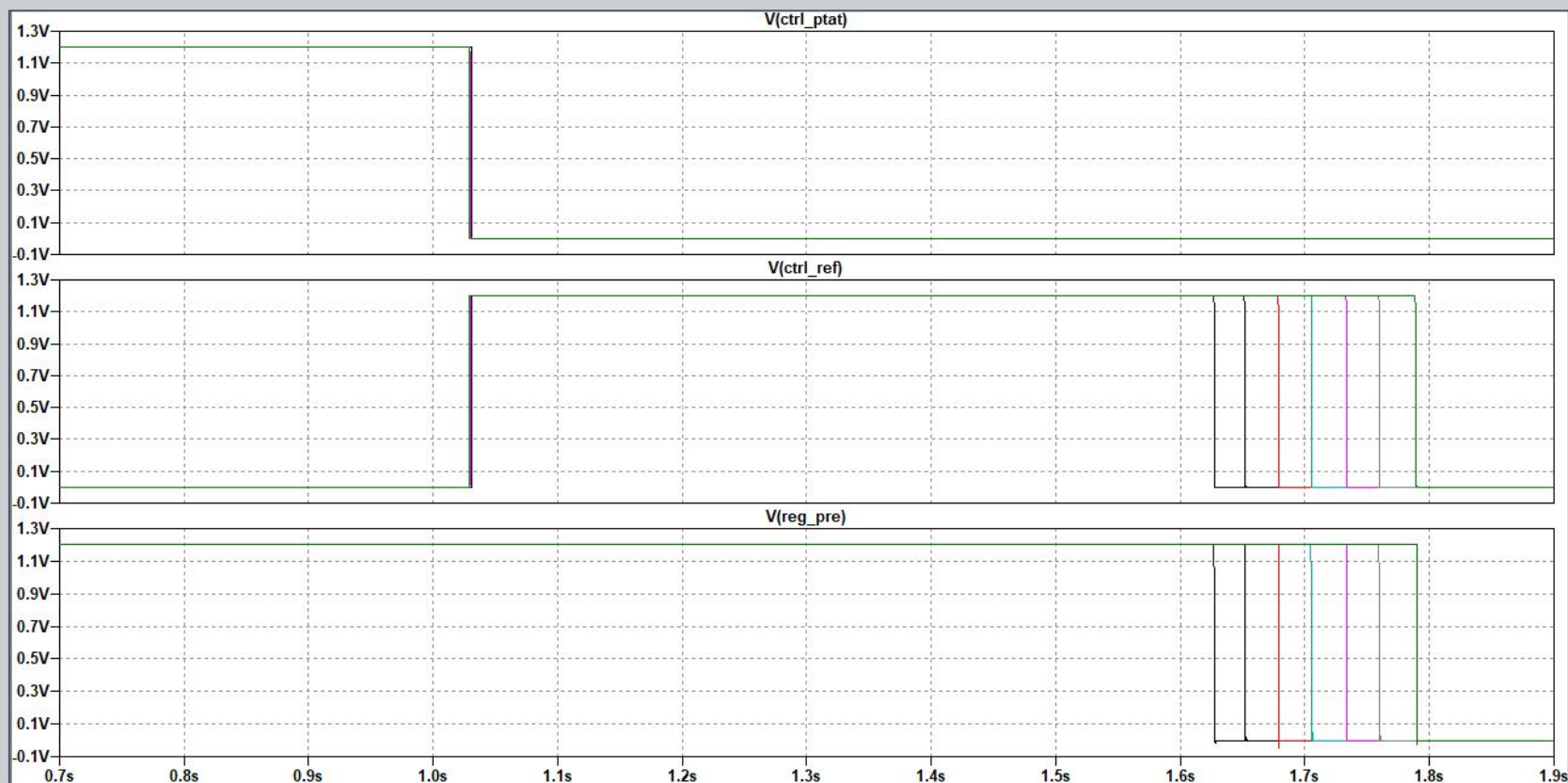
Análise - Integrador/Controle

O gráfico abaixo apresenta os sinais de controle das chaves ideais do bloco ADC em comparação com a saída do integrador. Observa-se que, em princípio o sinal de controle para a chave da tensão v_{ptat} está acionando (com a sua respectiva integração), sendo desligada no mesmo instante em que o sinal de controle de v_{ref} é acionado.



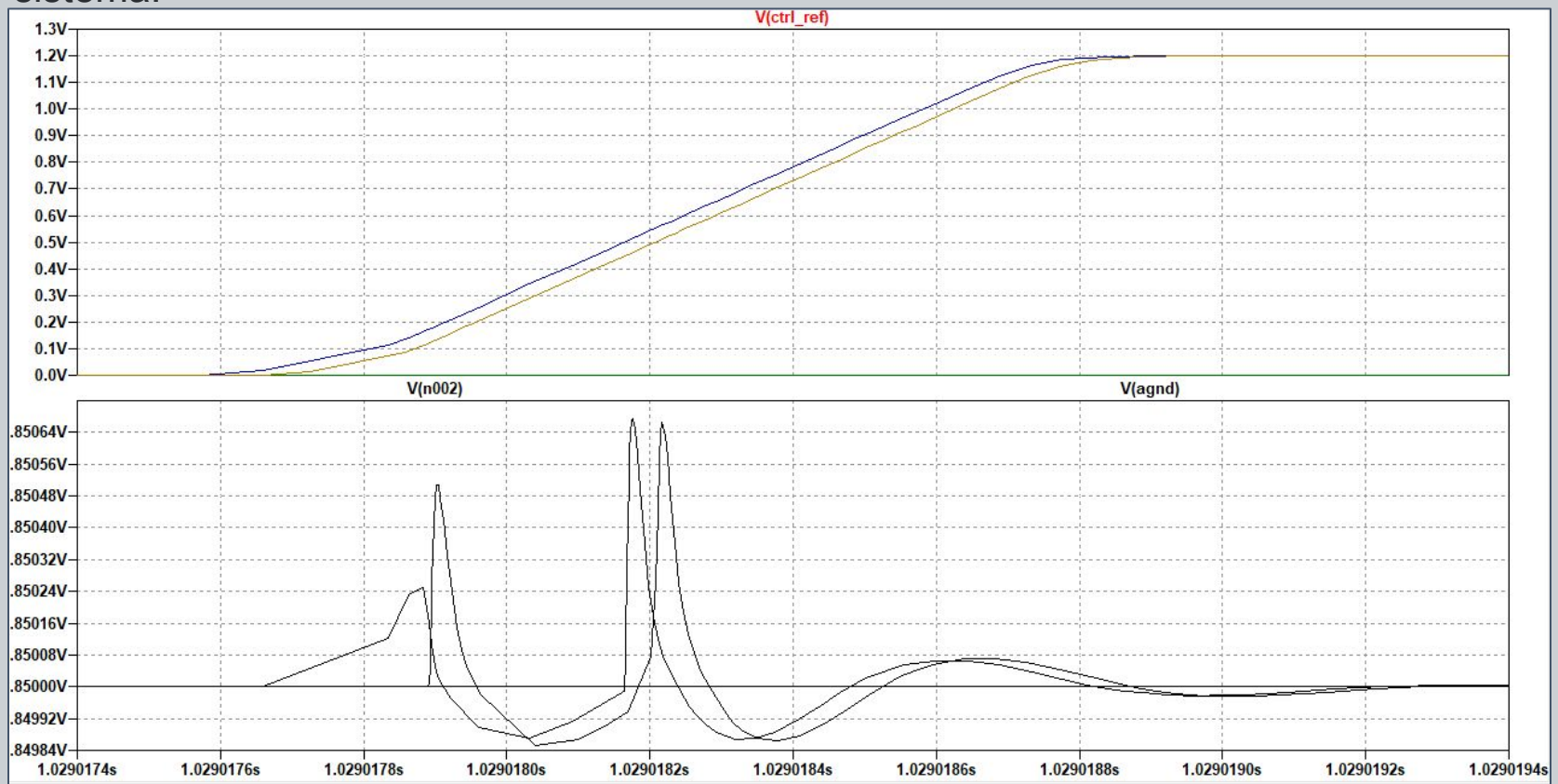
Análise - Sinais de Controle

O gráfico abaixo apresenta os sinais de controle para VPTAT, VREF e Registradores, respectivamente. Tais sinais são responsáveis por realizar troca dos estados no sistema, sendo o primeiro voltado à integração de PTAT, o segundo à integração da tensão de referência e o último dedicado a acionar o “enable” para gravação dos bits resultantes nos registradores.



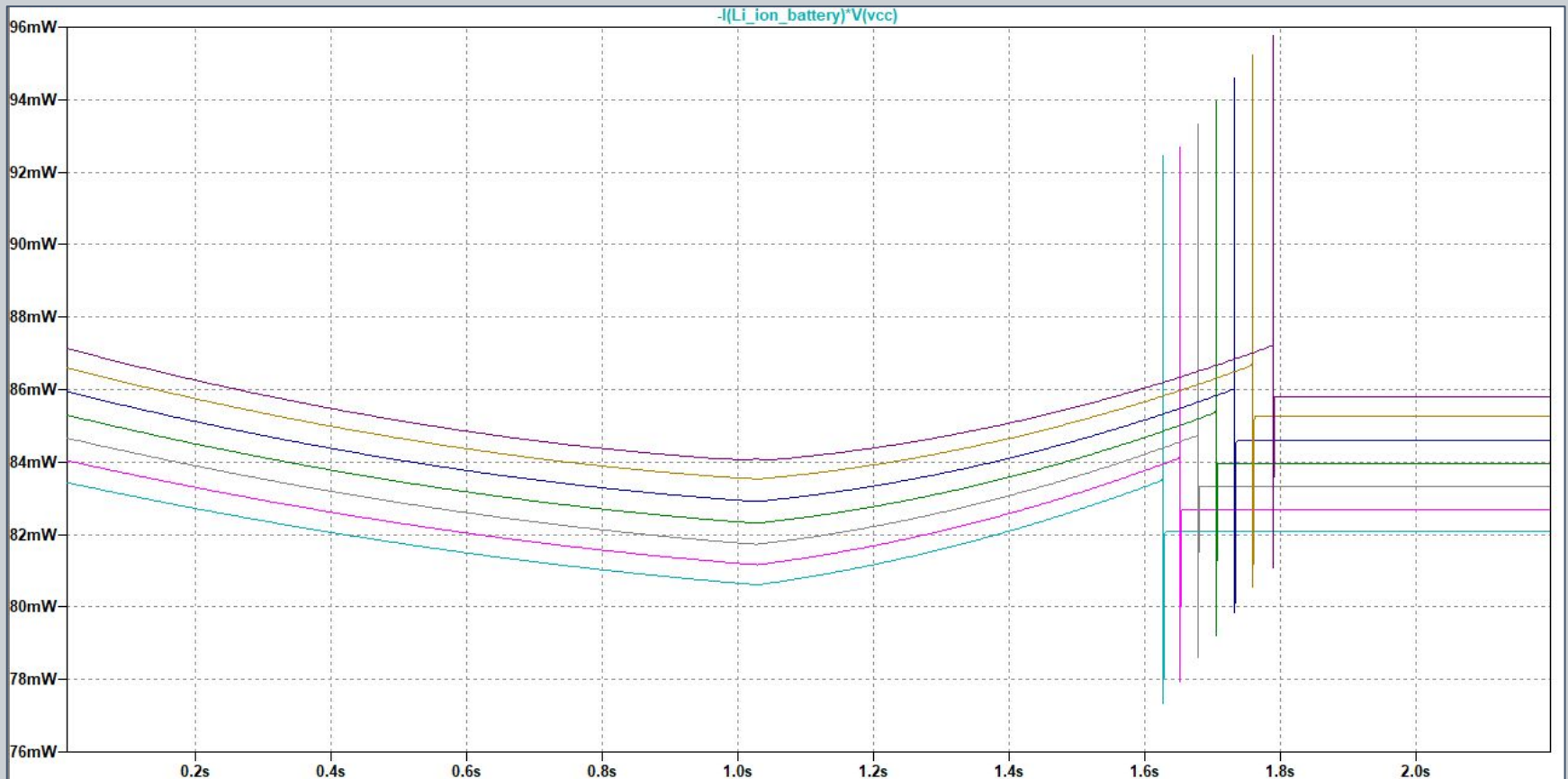
Análise - Oscilação da Alimentação

A tensão virtual $V_{CC}/2$ desenvolvida, em conjunto com uma configuração buffer, se mantém estável ao longo de todo o processo, havendo uma pequena excursão na transição de estados, como se verifica pelo gráfico apresentado. Tal excursão é de aproximadamente 0,8mV, não sendo significativa para alterar o comportamento geral do sistema.



Análise - Potência

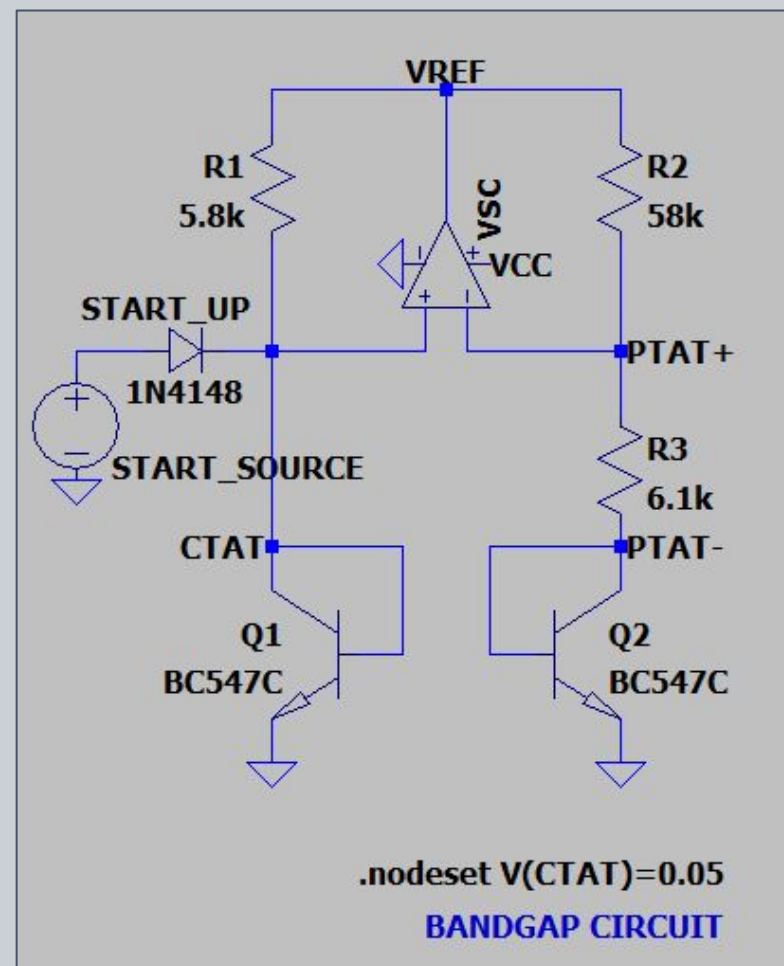
A potência média provida pela fonte de alimentação (bateria de Lítio-Ion) é proporcional à temperatura. Há um consumo médio de 80mW (para -40°C) e 84mW (para 80°C). Picos de potência são observados na transição para o estado de gravação do valor final de temperatura nos flip-flops registradores.



Análise - Potência

Para cálculo da potência consumida pelo circuito referência de tensão Bandgap foi desconsiderada a corrente do circuito startup (fonte START_SOURCE ilustrada na figura ao lado), a qual tem valor nominal de 1,34nA, sendo desprezível. Também foi desprezada a corrente de bias em ambos os terminais de entrada do opamp, se situando na ordem de 2nA, cada.

Sendo assim, a potência máxima consumida pelo bandgap (no caso de alimentação nominal 3,7Vdc e temperatura máxima de 80°C) é de 829uW.



Análise - Bandgap/Interface

O valor de referência (V_{REF}) e a tensão linearmente dependente da temperatura (V_{PTAT}) produzida pelo bandgap têm duas ordens de grandeza de diferença, então com um tratamento simétrico pelos amplificadores de instrumentação há um adequamento da amplitude de ambos os sinais. As tabelas abaixo mostram os valores em diferentes cenários de temperatura, os sinais BG_{REF} e BG_{PTAT} representam as saídas dos amplificadores de instrumentação com relação às entradas V_{REF} e V_{PTAT} .

Temperatura	V_{REF}	V_{PTAT}
-40°C	1,095V	44,58mV
-20°C	1,093V	48,60mV
0°C	1,091V	52,62mV
20°C	1,089V	56,62mV
40°C	1,086V	60,65mV
60°C	1,083V	64,66mV
80°C	1,080V	68,65mV

Temperatura	BG_{REF}	BG_{PTAT}
-40°C	3,059V	1,156V
-20°C	3,055V	1,128V
0°C	3,050V	1,100V
20°C	3,045V	1,072V
40°C	3,040V	1,043V
60°C	3,034V	1,015V
80°C	3,027V	0,986V

Análise - Precisão

O sensor apresenta uma precisão diferente para cada intervalo, sendo o mais conservador $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Contudo, como é exibido nas tabelas abaixo o sensor teria uma precisão muito maior se o valor de referência (V_{REF}) fosse conhecido com exatidão ao invés de um valor médio disponibilizado para a conversão do ADC.

Temperatura	V_{REF}	$V_{\text{PTAT_REAL}}$	$V_{\text{PTAT_ADC}}$	T_{2ADC}	E_{R}	$\Delta^{\circ}\text{C}$
-40°C	1,209V	693,669mV	694,024mV	588ms	0,0483%	$0,01932^{\circ}\text{C}$
0°C	1,201V	749,916mV	750,036mV	640ms	0,0159%	$0,01597^{\circ}\text{C}$
40°C	1,190V	806,694mV	806,695mV	694ms	0,000098%	$3,922\text{e-}5^{\circ}\text{C}$
80°C	1,177V	863,925mV	863,479mV	751ms	0,5168%	$0,0414^{\circ}\text{C}$

Intervalo	E_{R}	$\Delta^{\circ}\text{C}$
$(0_{-}40)^{\circ}\text{C}$	0,43%	$0,2^{\circ}\text{C}$
$(-40_{+}40)^{\circ}\text{C}$	0,76%	$0,3^{\circ}\text{C}$
$(-40_{+}80)^{\circ}\text{C}$	1,245%	$0,5^{\circ}\text{C}$

Observação: Como os amplificadores operacionais tem a referência virtual em $\sim 1,85\text{V}$, para os valores de V_{REF} e V_{PTAT} deve ser considerado esse “offset” do valor do sinal, ou seja, com a referência virtual diferente de 0V, há um deslocamento de 1,85V.

Análise - Áreas de aplicação

Sensores de Temperatura Integrados de alta precisão podem ser utilizados nas seguintes aplicações:

Pesquisas em Termomecânica;

Pesquisas em Termofísica;

Sistemas de Pasteurização;

Processos de Produção Alimentícia;

Equipamentos Médico-Hospitalares (EMH);

Qualificação e calibração de outros sensores de temperatura.

Análise - Comparação

A tabela a seguir apresenta sensores de temperatura integrados comerciais e suas respectivas especificações.

Modelo	Fabricante	Resolução bit	Precisão	Faixa de Operação	Alimentação
RS7303	André Mattos e Gustavo Simas (Regular Systems)	10 bits	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	-40°C a $+80^{\circ}\text{C}$	3,3 a 4,2V
ADT7310	Analog Devices	16 bits	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	-40°C a $+105^{\circ}\text{C}$	2,7 a 5,5V (270 μA)
ADT7420	Analog Devices	16 bits	$\pm 0,25^{\circ}\text{C}$	-20°C a $+105^{\circ}\text{C}$	2,7 a 5,5V (270 μA)
Si7051	Silicon Labs	14 bits	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$	-40°C a $+125^{\circ}\text{C}$	1,9 a 3,6V (90 μA)
TMP117	Texas Instruments	16 bits	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$	-20°C a $+50^{\circ}\text{C}$	1,8 a 5,5V (135 μA)

Revisão de Requisitos Gerais de Projeto

Algumas características propostas no projeto:

- ✗ Utilização de transistores MOS para o Bandgap proposto;
- ✓ Geração de própria tensão de referência (V_{ref});
- ✓ Precisão de valor medido de temperatura em $0,5^{\circ}\text{C}$;
- ✓ * Intervalo de medição de temperatura de -25 a 100°C
- ✗ Consumo médio do circuito de Bandgap em torno de $10\mu\text{W}$;
- ✓ Conversão A/D com amplificadores operacionais reais;
- ✓ Sistema em malha fechada com circuito realimentado;
- ✓ Simulação de características e resultados do circuito em software especializado (LTSPICE).

Alguns possíveis desafios do projeto:

- ✓ Projetar controlador para realimentação do sistema;
- ✓ Dimensionar o parâmetros do conversor A/D;
- ✓ Utilizar tensões e variações pequenas (V_{PTAT} , ΔV_{PTAT} e V_{SUPPLY});
- ✓ Propiciar robustez e garantia de precisão.

Considerações

Os resultados obtidos são satisfatórios e de acordo com os requisitos de projeto propostos na etapa inicial. Considera-se que para o desenvolvimento do sistema atual foi realizada uma análise de estado da arte de circuitos sensores de temperatura para então ser esboçada uma concepção de projeto.

São sugeridas ações para aperfeiçoamento do sistema:

Aperfeiçoamento de topologia do Bandgap proposto;

Ajustar parâmetros do circuito para possibilitar uso de capacitores integrados (40 - 50 pF);

Ajustar componentes utilizados para ampliar faixa de operação;

Redução de consumo médio do sistema;

Inserção de não-idealidades para os blocos desenvolvidos

Referências

[1] BROKAW, A.P.; **A simple three-terminal IC bandgap reference**. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/1050532/>

[2] SILVA, João Gonçalo Clemente da; **Project of a bandgap voltage reference and a temperature sensor for "energy harvest" systems**. Disponível em:

https://run.unl.pt/bitstream/10362/11330/1/Silva_2013.pdf

[3] FILHO, Jader Alves de Lima, et al.; **LOW POWER VOLTAGE REFERENCE**. Disponível em:

<https://patents.google.com/patent/US7486129B2/en>

[4] JOHN, Victor Du. **Design of Low Power ADC Using 0.18μm CMOS Technology**. Disponível em:

<https://www.ijert.org/research/design-of-low-power-adc-using-0.18m-cmos-technology-IJERTV3IS11173.pdf>

[5] STATISTA. **Projected temperature sensors market size worldwide, from 2016 to 2022 (in billion U.S. dollars)**. Disponível em:

<https://www.statista.com/statistics/675169/worldwide-temperature-sensors-market-size/>

[6] LINEAR TECHNOLOGY. **LT1677**. Disponível em:

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1677fa.pdf>

Contatos

E-mail: andrempmattos@gmail.com
gustavosimassilva@gmail.com



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA