



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

**Engenharia reversa: Neuroestimulador aplicado
a pacientes com Dores Crônicas - Análise in
vitro.**

Autor: Luiz Cláudio Percy Ferreira Filho
Orientadora: Dr^a. Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa

Brasília, DF
2015



Luiz Cláudio Percy Ferreira Filho

**Engenharia reversa: Neuroestimulador aplicado a
pacientes com Dores Crônicas - Análise in vitro.**

Monografia submetida ao curso de graduação
em Engenharia Eletrônica da Universidade de
Brasília, como requisito parcial para obten-
ção do Título de Bacharel em Engenharia
Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr^a. Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa

Coorientador: Mestranda Mileny Ximenes Oliveira

Brasília, DF

2015

Luiz Cláudio Percy Ferreira Filho

Engenharia reversa: Neuroestimulador aplicado a pacientes com Dores Crônicas - Análise in vitro./ Luiz Cláudio Percy Ferreira Filho. – Brasília, DF, 2015-55 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Dr^a. Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2015.

1. Dor crônica. 2. Engenharia reversa. 3. Microcontrolador. 4. Neuroestimulação medular. I. Dr^a. Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Engenharia reversa: Neuroestimulador aplicado a pacientes com Dores Crônicas - Análise in vitro.

CDU 02:141:005.6

Luiz Cláudio Percy Ferreira Filho

Engenharia reversa: Neuroestimulador aplicado a pacientes com Dores Crônicas - Análise in vitro.

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 07 de julho de 2015:

**Prof^a. Dr^a. Suélia de Siqueira
Rodrigues Fleury Rosa**
Orientadora

Mestranda Mileny Ximenes Oliveira
Coorientadora

Prof. Dr. Adson Ferreira da Rocha
Membro Convidado

Dr^a. Luciana Peixoto
Membro Convidado

Brasília, DF
2015

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me abençoado e me ajudado na conclusão de mais uma etapa da minha formação. Agradeço também a minha orientadora professora Suélia e a minha co-orientadora Mileny por terem me dado direcionamento e motivação para a conclusão desse trabalho. E também agradeço aos meus pais e a minha irmã que me deram suporte e apoio ao longo desses anos.

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá.

De alguma maneira você chega lá."

(Ayrton Senna)

Resumo

A dor crônica é uma enfermidade que acomete um número crescente de pessoas no mundo. Após um certo tempo, os fármacos e tratamentos alternativos não fazem tanto efeito, sendo necessário a utilização de outros métodos, como o da neuroestimulação medular. Desta forma, este documento tem como objetivo principal desenvolver um neuroestimulador que estimule utilizando corrente. Foram escolhidos diferentes XTR, que são circuitos integrados que convertem tensão em corrente.

Palavras-chaves: Dor crônica, engenharia reversa, neuroestimulação, XTR, estimulação por corrente.

Abstract

Chronic pain is a disease that affects a growing number of people worldwide. After a while, drugs and alternative treatments do not influence much, being necessary to use other methods, such as neurostimulation of the spinal cord. Thus, this paper aims to develop a neurostimulator. Different were chosen XTR , which are integrated circuits that convert voltage current.

Key-words: Chronic pain, reverse engineering, neurostimulation, XTR, current stimulation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Circuito integrado XTR110.	19
Figura 2 – Informações dos CI's XTR110.	20
Figura 3 – (a) V_{REF} x Frequência; (b) Fonte de alimentação x Frequência.	21
Figura 4 – (a) Temperatura de junção x V_{REF} Corrente de saída; (b) Erro total na saída x Temperatura.	21
Figura 5 – (a) I_{CC} x Temperatura; (b) R_L Máximo x V_{CC}	21
Figura 6 – (a) Tempo de resolução com passo negativo V_{IN} ; (b) Resposta de pulso.	22
Figura 7 – Tempo de resolução com passo positivo V_{IN}	22
Figura 8 – (a) Circuito interno que compõe o XTR110, composto por 2 amplificadores, 9 resistores e 1 transistor NPN. (<i>Texas Instruments</i>); (b) Pinagem do XTR110. (<i>Texas Instruments</i>)	22
Figura 9 – Componentes e conexões para se obter uma saída de 0 a 20 mA.	24
Figura 10 – Q_{EXT} utilizando transistores PNP.	25
Figura 11 – Ajuste opcional na tensão de referência.	26
Figura 12 – Aumento da corrente interna.	27
Figura 13 – Offset e ajuste do Span, para tensões de entrada entre 0 V a +10 V e saída de 4 mA a 20 mA.	27
Figura 14 – Zero e Span para entradas de 0 V a +10 V e saída de 4 mA a 20 mA.	28
Figura 15 – Zero e Span para entradas de 0 V a +10 V e saída de 4 mA a 20 mA.	28
Figura 16 – +/-200 mA de corrente.	29
Figura 17 – Canal isolado de 4 mA a 20 mA.	30
Figura 18 – Conversor de tensão-em-corrente de 0 mA a 10 mA.	30
Figura 19 – DIP - Dual In-line Package 16 pinos cerâmico.	31
Figura 20 – DIP - Dual In-line Package 16 pinos plástico.	31
Figura 21 – SOL - Small outline large de 16 pinos.	32
Figura 22 – Diagrama básico do XTR300.	34
Figura 23 – Circuito padrão para o modo de saída de tensão.	35
Figura 24 – Circuito padrão para o modo de saída de corrente.	35
Figura 25 – Circuito padrão para seleção externa do modo de saída.	36
Figura 26 – Circuito padrão do XTR111.	38
Figura 27 – Conexões básicas para uma entrada de 0 V a 5 V e uma saída de 0 mA a 20 mA.	38
Figura 28 – Comportamento da corrente de saída do XTR110 com várias cargas.	40
Figura 29 – Média e Barra de confiança com 99% de confiança.	41
Figura 30 – Esquemático do XTR111 no <i>TINA</i>	42

Figura 31 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 0 V a saída obtida foi de 308,13 nA.	42
Figura 32 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 1 V a saída obtida foi de 4 mA.	43
Figura 33 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 2 V a saída obtida foi de 8 mA.	43
Figura 34 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 3 V a saída obtida foi de 12 mA.	44
Figura 35 – tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 4 V a saída obtida foi de 16 mA.	44
Figura 36 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 5 V a saída obtida foi de 20 mA.	45
Figura 37 – Gráfico com os valores obtidos na simulação do XTR111.	45
Figura 38 – Esquemático do XTR110 no <i>LTSpice</i>	46
Figura 39 – Gráfico do XTR110 simulado no <i>LTSpice</i> para uma carga de 400Ω. . .	46
Figura 40 – Gráfico do XTR110 simulado no <i>LTSpice</i> para uma carga de 500Ω. . .	47
Figura 41 – Gráfico do XTR110 simulado no <i>LTSpice</i> para uma carga de 650Ω. . .	47
Figura 42 – Gráfico do XTR110 simulado no <i>LTSpice</i> para uma carga de 800Ω. . .	48
Figura 43 – Gráfico do XTR110 simulado no <i>LTSpice</i> para uma carga de 1 KΩ. . .	48
Figura 44 – Esquemático do XTR110 no <i>TINA</i>	49
Figura 45 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 0 V a saída obtida foi de 2,22 uA.	49
Figura 46 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 1 V a saída obtida foi de 4 mA.	50
Figura 47 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 2 V a saída obtida foi de 8 mA.	50
Figura 48 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 3 V a saída obtida foi de 12 mA.	51
Figura 49 – tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 4 V a saída obtida foi de 16 mA.	51
Figura 50 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 5 V a saída obtida foi de 20 mA.	52

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	12
1.2	JUSTIFICATIVA	12
2	HISTÓRICO	14
2.1	DOR CRÔNICA	14
2.2	SISTEMA NERVOSO	14
2.3	ELETROESTIMULAÇÃO	15
3	NEUROESTIMULADOR	16
4	ESTIMULAÇÃO POR TENSÃO X ESTIMULAÇÃO POR CORRENTE	17
5	OBJETIVO DA PESQUISA	18
5.1	CONVERSOR TENSÃO-CORRENTE	18
6	XTR110	19
6.1	DESCRIÇÃO DO XTR110	19
6.2	CARACTERÍSTICAS DO XTR110	19
6.3	APLICAÇÕES DO XTR110	20
6.4	VALORES MÁXIMOS SUPOSTADOS PELO XTR110	20
6.5	CURVAS TÍPICAS DE DESEMPENHO	20
6.6	DESCRIÇÃO DA PINAGEM DO XTR110	22
6.7	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO XTR110	24
6.8	DISSIPACÃO DO TRANSISTOR	25
6.9	ALCANCE DA TENSÃO DE ENTRADA	25
6.10	TERRA COMUM	26
6.11	TENSÃO DE REFERÊNCIA	26
6.12	AJUSTE DO OFFSET(ZERO)	27
6.13	AJUSTE DO SPAN(ALCANCE)	28
6.14	EXTENSÃO DO SPAN	29
6.15	APLICAÇÕES TÍPICAS	29
6.16	DIMENSIONAMENTO DOS MODELOS DE XTR110	30
7	XTR300	33
7.1	DESCRIÇÃO	33

7.2	CARACTERÍSTICAS	33
7.3	APLICAÇÕES	33
7.4	POSSÍVEIS CONFIGURAÇÕES DO XTR300 E SUAS RESPECTIVAS FUNÇÕES DE TRANFERÊNCIA	34
8	XTR111	37
8.1	DESCRIÇÃO	37
8.2	CARACTERÍSTICAS	37
8.3	CONFIGURAÇÕES DO XTR111 E SUAS RESPECTIVAS FUNÇÕES DE TRANFERÊNCIA	37
9	RESULTADOS	39
9.1	TESTES REALIZADOS COM O XTR110	39
9.2	SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O XTR111	41
9.3	SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O XTR110	45
9.3.1	LTSpice	45
9.3.2	TINA	48
10	DISCUSSÕES	53
10.1	ESCOLHA ENTRE OS XTR'S	53
	Referências	54

1 INTRODUÇÃO

A busca por desenvolver novas técnicas de tratamento, métodos e equipamentos que fossem eficazes no combate a doenças e enfermidades, sempre foi um dos grandes incentivos para que o homem estudasse diversas enfermidades em busca de soluções para melhorar a qualidade de vida das pessoas acometidas por doenças. Para solucionar esses agravos, o trabalho em conjunto de profissionais de diferentes áreas sempre foi um dos pontos fortes dessas pesquisas, criando assim um ambiente comum entre a parte biológica por meio dos especialistas das mais diversas áreas da saúde, com a parte física e matemática, envolvendo os profissionais responsáveis pela desenvolvimento e implementação de aparelhos biomédicos, capazes de auxiliar no tratamento de doenças. Nessa linha o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo de neuroestimulador medular, voltado ao tratamento de pacientes acometidos por dores crônicas.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento por meio da engenharia reversa de um protótipo de estimulação neurológica que será utilizado na neuroestimulação medular de pacientes acometidos pela dor crônica. Os objetivos específicos são:

- Obtenção das características construtivas e funcionais de um neuroestimulador;
- Descrição da forma de funcionamento, da estimulação por corrente;
- Determinar os componentes eletrônicos e mecânicos que compõe o dispositivo, assim como as suas relações;
- Analisar as características dos componentes e suas funções;
- Propor novo dispositivo que realize as mesmas funções de um neuroestimulador comercial;
- Realizar testes e simulações com os XTR's;

1.2 JUSTIFICATIVA

A dor crônica pode ser definida como uma dor contínua de duração mínima de três meses, tendo a função de alertar o corpo humano. Quando não tratada, ela pode causar

incapacidades e inabilidades prolongadas, pois mesmo após procedimentos terapêuticos convencionais, a dor crônica não desaparece.(SMITH et al., 2001)

Segundo o vice-presidente da Sociedade Brasileira de Estudos para a Dor (SBED), Durval Campos Kraychete, cerca de 20% a 30% da população mundial sofrem com dores crônicas. No Brasil esses valores ficam na faixa de 15% a 40%, variando de estado para estado.(Agência Brasil, 2013)

2 HISTÓRICO

2.1 DOR CRÔNICA

A palavra dor deriva do latim da palavra “poena” e é definida como uma sensação a qual a pessoa sente um desconforto, angústia, ou sofrimento devido a estímulos de nervos sensitivos tendo a sua ocorrência em diferentes graus de intensidade.

A dor pode ser caracterizada como uma experiência sensorial e emocional, com sensação desagradável, associada a um dano real ou potencial dos tecidos, ou descrita em termos de tais danos.(IASP, 1994) Mesmo com essas definições, a dor ainda é algo subjetivo não apresenta uma exata definição, visto que existe uma variação nas sensações que cada indivíduo tem da dor.

Ela pode ser definida como aguda ou crônica, tendo como critério de classificação mais usado o seu tempo de duração. A dor aguda ocorre por um tempo muito curto, por volta de de 1 mês, e a sua causa é facilmente identificada. Ela tem a função de ser um sinal de alerta para o corpo de inflamações ou lesões. A dor crônica por sua vez, tem um período de manifestação maior, sendo esse de no mínimo 3 meses, com causa de difícil indentificação. Com esse tempo a dor já é considerada crônica sendo constante e intermitente. Na maioria das vezes está associada a uma doença crônica, exigindo assim uma maior atenção. A dor crônica pode ser dividida em três tipos principais: a dor "nociceptiva", devida a uma alteração de tecidos variados e onde há a transmissão da dor por meio de fibras nervosas específicas; a dor "neuropática", que ocorre devido a lesões no tecido nervoso como nos nervos e na medula; e a dor "mista", que apresenta características de nocicepção e de neuropatia.(SANCHIS, 2014)

2.2 SISTEMA NERVOSO

O Sistema Nervoso tem a capacidade de receber, transmitir, elaborar e armazenar informações. Recebe informações sobre alterações no meio externo, relacionando o indivíduo com o ambiente, e no meio interno. Define-se sistema nervoso como o conjunto de órgãos que transmitem a todo o organismo os impulsos necessários aos movimentos e às diversas funções, e recebem do próprio organismo e do mundo externo as sensações.(FARIA, 2006)

O sistema nervoso pode ser dividido em duas partes: o sistema nervoso central (SNC) que está alojado na cavidade craniana (encéfalo) e no canal vertebral (medula espinhal). O encéfalo pode ser dividido em cérebro, diencefalo, cerebelo e tronco cerebral. A medula

espinhal por sua vez é composta por tratos de fibras nervosas que permitem a condução bidirecional dos impulsos nervosos e funciona como centro nervoso de atos involuntários. O sistema nervoso periférico inclui 12 pares de nervos cranianos com seus ramos, e também 31 pares de nervos espinhais com seus ramos. O sistema periférico possui duas divisões principais: a divisão sensorial ou aferente e a divisão motora ou eferente. A divisão sensorial transmite informações ao SNC, informando-o o que está ocorrendo em todas as partes do corpo. Já a divisão motora leva a informação do SNC para a periferia.(GUYTON; HALL, 2006)

2.3 ELETROESTIMULAÇÃO

No século XVIII, o fisiologista Luigi Galvani começou uma série de experimentos utilizando uma máquina eletrostática movida a fricção(máquina de Ramsden), e um capacitor, aplicando cargas elétricas em nervos e músculos de rãs e sapos.(SABBATINI, 2004)

Shealey em 1967 e Cook em 1976 realizaram os primeiros experimentos, implantando eletrodos de estimulação medular em pacientes com vasculopatias periféricas. Com esses testes eles observaram um controle da dor, assim como uma melhor cicatrização das úlceras nos pacientes.(BAROLAT, 2000)O método utilizado baseia-se na teoria do portão da dor, elaborada em 1965, por Wall e Melzack, que admitia a existência nos cordões posteriores medulares um mecanismo neural que se comportava como um portão, podendo assim aumentar ou diminuir o débito dos impulsos transmitidos desde as fibras periféricas ao sistema nervoso central.(MELZACK; WALL, 1965)

Linderoth e Foreman propuseram que a ativação antidrômica dos cordões posteriores pela estimulação medular poderia ter um efeito inibitório na hiperexcitabilidade de neurônios sensibilizados pela lesão nervosa periférica, assim como as estruturas espinhais e supra-espinhais poderiam também estar envolvidas na sensação analgésica obtida por meio da estimulação medular.(HOLSHEIMER, 2002)(EL-KHOURY et al., 2002)

O impulso nervoso é uma alteração elétrica que é transmitida ao longo da membrana do neurônio a partir do local em que ele foi estimulado. A direção do impulso no organismo é do corpo celular para o axônio. Esse impulso nervoso, ou potencial de ação, é uma alteração rápida da diferença de potencial transmembrana. A membrana do neurônio é polarizada em repouso, sendo que o potencial é negativo (-70 mV). O potencial de ação consiste de uma redução rápida da negatividade da membrana até 0mV e inversão deste potencial até valores de cerca de +30mV, seguido de um retorno rápido até valores um pouco mais negativos que o potencial de repouso de -70mV. O potencial de ação é um fenômeno de natureza eletro-química tendo duração de pouco mais de 1 milissegundo.(CARDOSO; MELLO; SABBATINI, 2000)

3 NEUROESTIMULADOR

O neuroestimulador é um aparelho biomédico utilizado para o tratamento, dentre outras enfermidades, da dor crônica e do mal de Parkinson, estimulando uma região da medula ou fazendo uma estimulação profunda no núcleo subtalâmico. Sua utilização se dá a partir do momento que os tratamentos convencionais não trazem mais resultados satisfatórios.

No caso da estimulação medular com a finalidade de reverter características mais severas das doenças, ele fornece sinais elétricos leves para o espaço peridural perto da espinha através de eletrôdos. Os sinais elétricos enviados são como uma branda parestesia, uma sensação cutânea de “formigamento” ou de frio ou de calor, sendo essa sensação mais agradável que a dor, modulando as mensagens de dor antes que elas atinjam o cérebro.(OLIVEIRA, 2013)

Estudos apontam que a eficiência do neuroestimulador, frente as dores crônicas, mostram que os pacientes tiveram um redução da dor na faixa de 50% a 70%. Vários pacientes relataram uma melhora considerável na sua capacidade de voltar a realizar normalmente as atividades de trabalho. Esse controle da dor pode vir a proporcionar um efeito positivo na melhora do estado psicológico do paciente, assim como na redução do estresse e na melhora de sua qualidade de vida.(SEARS et al., 2011)

4 ESTIMULAÇÃO POR TENSÃO X ESTIMULAÇÃO POR CORRENTE

Hoje na área de equipamentos biomédicos, a grande maioria dos neuroestimuladores conseguem estimular a medula tanto por controle de corrente como por controle de tensão. Estudos foram realizados por Schade e Washburn, com o objetivo de verificar qual o tipo de estimulação que os pacientes que utilizam o neuroestimulador preferem. Como resultado eles obtiveram uma faixa de 70% de pacientes que preferiram a estimulação por corrente, devido a fatores como o alcance de níveis menores de dor, alcance da região de estimulação assim como a melhoria na qualidade de vida.(SCHADE et al., 2010)(WASHBURN et al., 2014)

Os valores de corrente associados a percepção da parestesia em pacientes é constante. Ou seja assim que a parestesia é alcançada ela irá se perdurar enquanto a corrente for mantida no mesmo valor. No caso da estimulação por tensão essa sensação de parestesia não é continua pois a corrente não se mantém fixa, devido a variações na impedância.(ALO, 2002)

Assim, para que essa estimulação por corrente seja realizada foram escolhidos circuitos que tivessem em sua saída um valor de corrente, que fosse satisfatório para tal aplicação.

5 OBJETIVO DA PESQUISA

Este trabalho de conclusão de curso, tem por objetivo principal o estudo e análise de um conversor de tensão em corrente, para aplicações em eletroestimulações.

Esse estudo será realizado tendo como base uma comparação entre três modelos de XTR(XTR110, XTR111 e XTR300) que são circuitos integrados desenvolvidos pela *Texas Instruments*, sendo que a função principal e desejada por esse trabalho dos XTR é a obtenção de uma corrente de saída a partir de uma tensão aplicada na entrada.

5.1 CONVERSOR TENSÃO-CORRENTE

Foi utilizado o circuito integrado XTR110 produzido pela *Texas Instruments* para gerar uma fonte de corrente controlada por tensão. Esse conversor possui uma faixa de tensão de entrada de 0 a 5 V gerando uma saída de 0 a 20 mA. Mais a frente será detalhado o porque da escolha do XTR110 assim como o seu funcionamento.

6 XTR110



Figura 1 – Circuito integrado XTR110.

6.1 DESCRIÇÃO DO XTR110

O XTR110 é um circuitito integrado desenvolvido pela *Texas Instruments* que tem como função ser um preciso conversor de tensão-corrente na transmissão de sinais analógicos. Ele suporta tensões de entrada de 0 a 5 V ou de 0 a 10V e suas correntes de saída podem ser definidas entre 4 a 20 mA , 0 a 20 mA , 5 a 25mA , entre outras faixas. Ele possui internamente uma referência de tensão de 10 V que pode ser usada para controlar um circuito externo. O XTR110 é fabricado em diferentes tipos de materiais, sendo eles: DIP(*Dual In-line Package* ou encapsulamento em linha dupla de 16 pinos confeccionado em material plástico ou cerâmico e SOL(*Small outline large*) de 16 pinos. Por possuir esses três possíveis encapsulamentos, o XTR110 se torna um excelente componente eletrônico, pois pode ser inserido tanto em *protoboards* para prototipagens rápidas, como também ser soldado em PCI, otimizando o dimensionamento da placa de circuito impresso.

6.2 CARACTERÍSTICAS DO XTR110

- Transmissor de corrente de 4 a 20 mA;
- Faixas de entrada/saída selecionáveis: entradas de 0 a 5 V ou de 0 a 10V e saídas de 0 a 20mA, 5 a 25mA entre outros intervalos de corrente;
- Máximo de 0,005% de não-linearidade , 14 BIT;
- Referência de saída precisa de +10 V;
- Opera com fonte única;

- Grande intervalo de alimentação: de 13.5 a 40 V.

6.3 APLICAÇÕES DO XTR110

- Controle de processos industriais;
- Transmissores de pressão/temperatura;
- Circuitos transdutores;
- Sistema de monitoramento da alimentação;
- Referência de fonte de corrente para aquisição de dados;
- Fonte de corrente programável para teste de equipamento.

6.4 VALORES MÁXIMOS SUPOSTADOS PELO XTR110

- Fornecimento de energia, $+V_{cc} \Rightarrow 40$ V;
- Tensão de entrada, V_{in1} , V_{IN2} , $V_{REF} \Rightarrow +V_{cc}$;
- Faixa de temperatura $\Rightarrow -55^{\circ}\text{C}$ a $+125^{\circ}\text{C}$;
- Corrente de saída utilizando resistor interno de $50\Omega \Rightarrow 40$ mA.

PRODUCT	PACKAGE-LEAD	PACKAGE DESIGNATOR	TEMPERATURE RANGE
XTR110AG	DIP-16 Ceramic	JD	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
XTR110BG	DIP-16 Ceramic	JD	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
XTR110KP	DIP-16 Plastic	N	0°C to $+70^{\circ}\text{C}$
XTR110KU	SOL-16 Surface-Mount	DW	0°C to $+70^{\circ}\text{C}$

Figura 2 – Informações dos CI's XTR110.

6.5 CURVAS TÍPICAS DE DESEMPENHO

Abaixo são mostrados alguns gráficos do desempenho do XTR110 para $T_A = +25^{\circ}\text{C}$, $V_{cc} = 24\text{VDC}$ e $R_L = 250\Omega$.

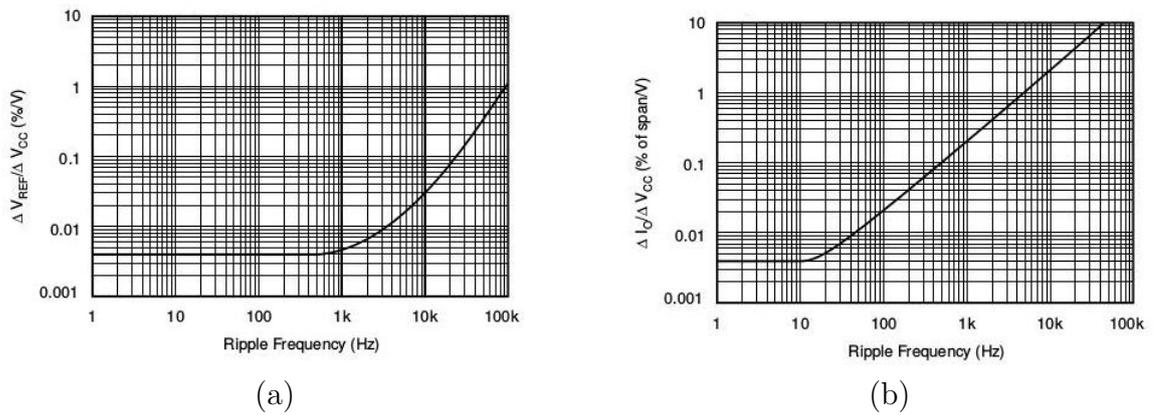


Figura 3 – (a) V_{REF} x Frequência; (b) Fonte de alimentação x Frequência.

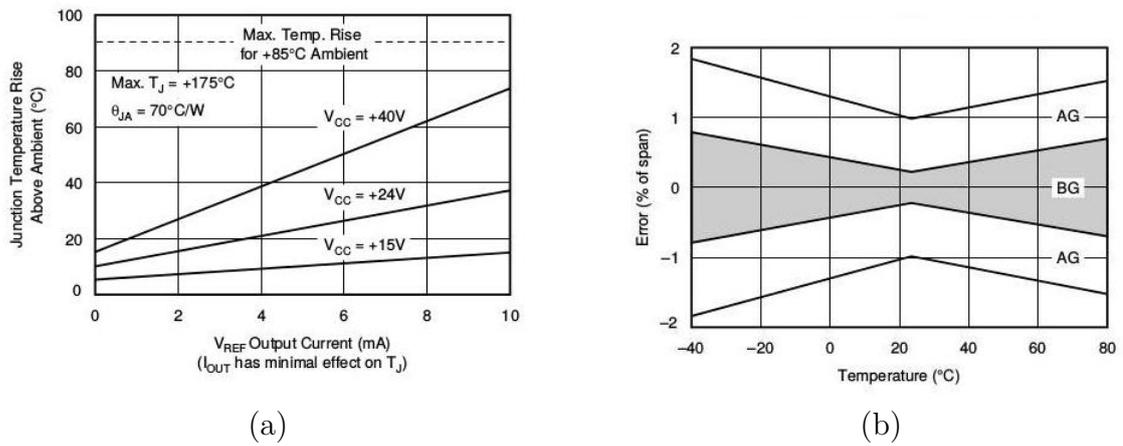


Figura 4 – (a) Temperatura de junção x V_{REF} Corrente de saída; (b) Erro total na saída x Temperatura.

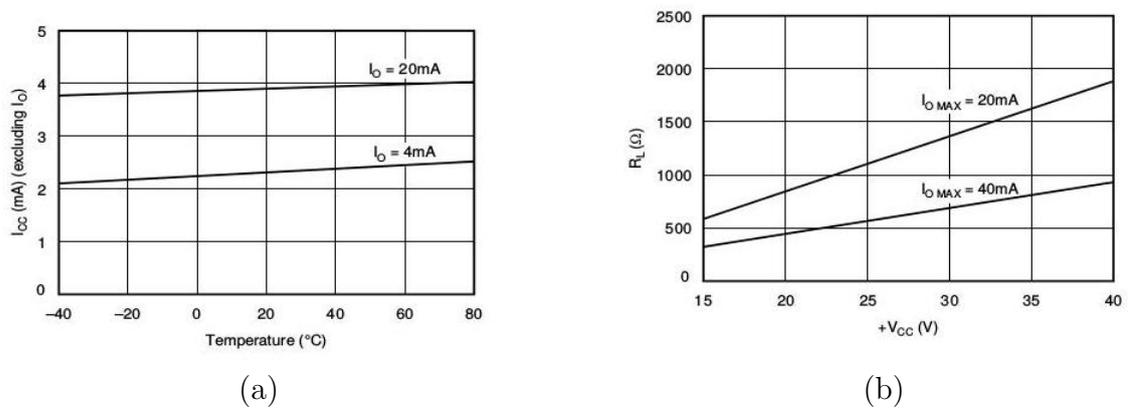


Figura 5 – (a) I_{CC} x Temperatura; (b) R_L Máximo x V_{CC} .

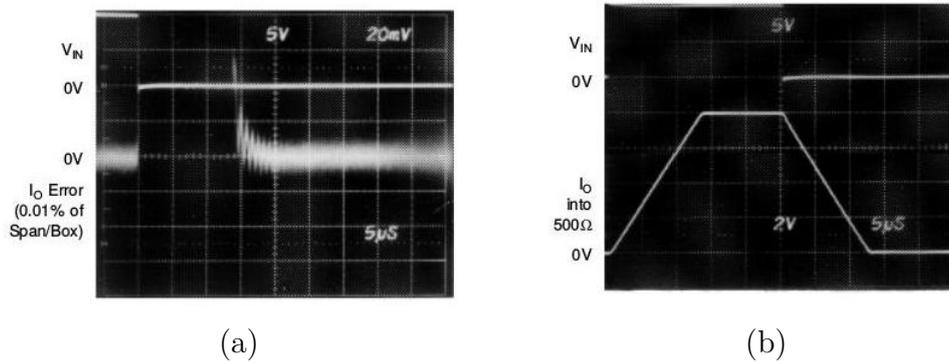


Figura 6 – (a) Tempo de resolução com passo negativo V_{IN} ; (b) Resposta de pulso.

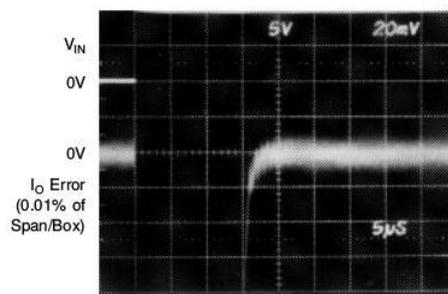


Figura 7 – Tempo de resolução com passo positivo V_{IN}

6.6 DESCRIÇÃO DA PINAGEM DO XTR110

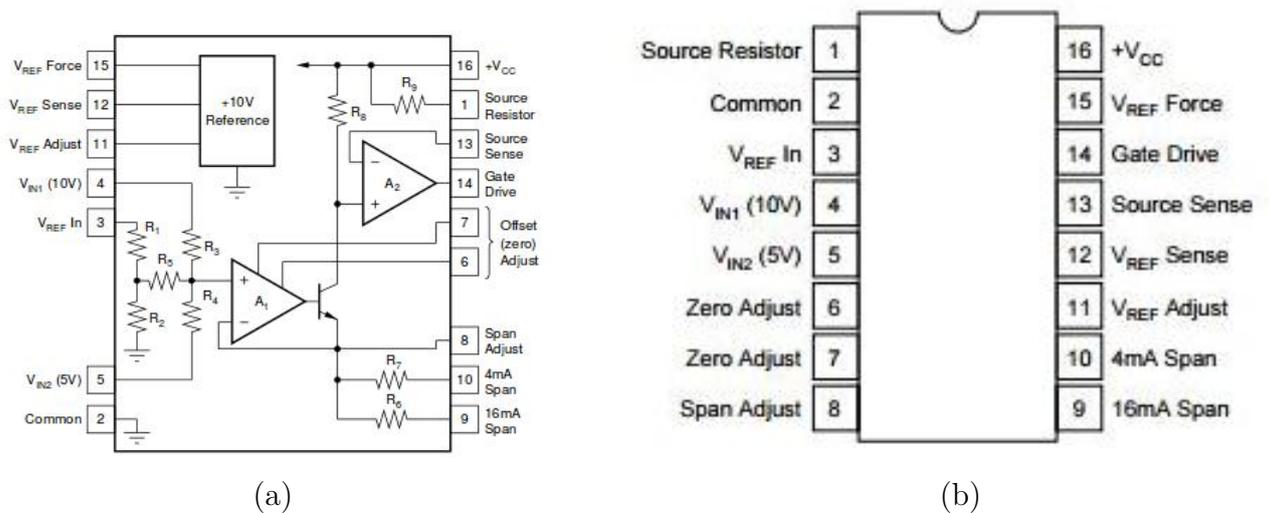


Figura 8 – (a) Circuito interno que compõe o XTR110, composto por 2 amplificadores, 9 resistores e 1 transistor NPN. (Texas Instruments); (b) Pinagem do XTR110. (Texas Instruments)

- Pino 1: resistor da fonte;
- Pino 2: terra comum;
- Pino 3: entrada da tensão de referência V_{ref} ;
- Pino 4: entrada da tensão $V_{in1}(10\text{ V})$;
- Pino 5: entrada da tensão $V_{in2}(5\text{ V})$;
- Pino 6: zero de ajuste;
- Pino 7: zero de ajuste;
- Pino 8: ajuste do alcance;
- Pino 9: alcance de 16 mA de corrente;
- Pino 10: alcance de 4 mA de corrente;
- Pino 11: ajuste da tensão de referência V_{ref} ;
- Pino 12: sensibilidade da tensão de referência V_{ref} ;
- Pino 13: sensibilidade da fonte;
- Pino 14: drive da saída do OpAmp A2;
- Pino 15: potência da tensão de referência V_{ref} ;
- Pino 16: entrada $+V_{cc}$ do XTR110.

Na figura 9 é mostrada as conexões básicas necessárias para se obter uma corrente de saída de 0 a 20 mA aplicando uma tensão de entrada de 0 a 5 V. Para se obter outras faixas de corrente de saída inserindo diferente tensões de entrada são necessárias mudanças nas conexões dos pinos 3, 4, 5, 9 e 10, como apresentado na figura 1 abaixo.

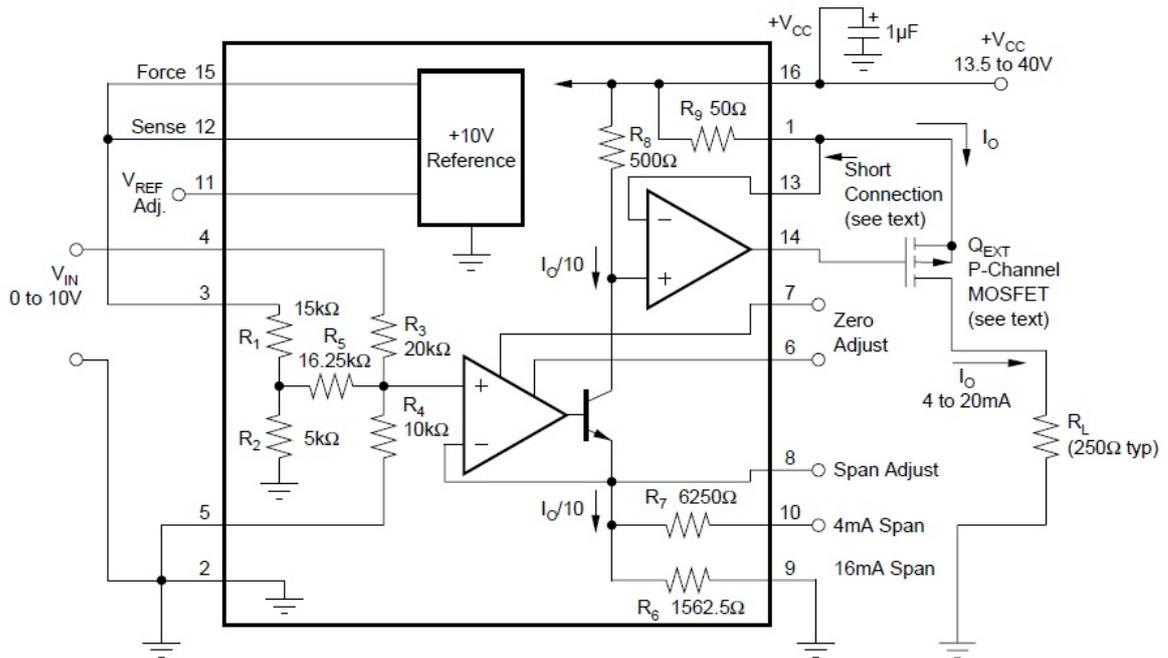


Figura 9 – Componentes e conexões para se obter uma saída de 0 a 20 mA.

INPUT [V]	OUTPUT [mA]	PIN 3	PIN 4	PIN 5	PIN 9	PIN 10
0-10	0-20	Com	Input	Com	Com	Com
2-10	4-20	Com	Input	Com	Com	Com
0-10	4-20	+10V Ref	Input	Com	Com	Open
0-10	5-25	+10V Ref	Input	Com	Com	Com
0-5	0-20	Com	Com	Input	Com	Com
1-5	4-20	Com	Com	Input	Com	Com
0-5	4-20	+10V Ref	Com	Input	Com	Open
0-5	5-25	+10V Ref	Com	Input	Com	Com

Tabela 1 – Possíveis valores de configuração do XTR110.

6.7 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO XTR110

A função de transferência completa do XTR110 é apresentada na equação 6.1.

$$I_o = \frac{10 \left(\frac{V_{RefIN}}{16} + \frac{V_{IN1}}{4} + \frac{V_{IN2}}{2} \right)}{R_{SPAN}} \quad (6.1)$$

R_{SPAN} é a impedância total vista no emissor do transistor interno NPN. Esta impedância varia dependendo da forma que os pinos 8, 9 e 10 são configurados. A região de operação típica foi apresentada acima na figura 9.

Um transistor externo de passagem, Q_{EXT} , é necessário conforme mostrado na figura 9. Este transistor conduz o sinal da corrente de saída. É recomendado utilizar um transistor MOSFET com canal P. Deve se ter uma tensão nominal igual ou superior á tensão máxima de alimentação.

Um diodo zener de 12 V é utilizado para proteger Q_{EXT} de uma tensão de ruptura menor que $+V_{CC}$, o que acarretaria uma possível falha no circuito.

Dois transistores PNP discretos, conectados no modo *Darlington*, podem ser utilizados para Q_{EXT} , como é mostrado na figura 10. É possível observar que é necessário o uso de um capacitor para dar estabilidade. O uso de transistores *Darlington* integrados não é recomendado pois sua conexão interna da base-emissor causa erros ao sistema.

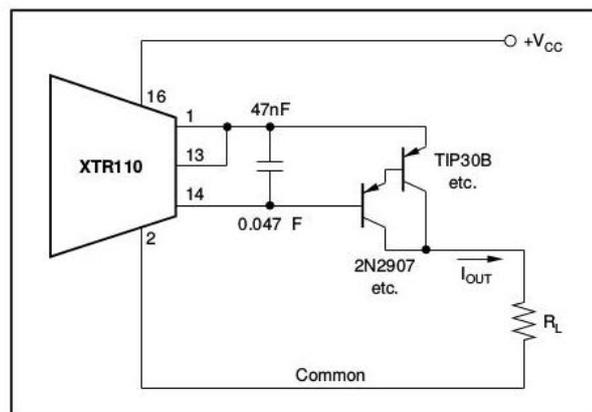


Figura 10 – Q_{EXT} utilizando transistores PNP.

6.8 DISSIPACÃO DO TRANSISTOR

A dissipação máxima de potência do Q_{EXT} depende da tensão de alimentação e da escala de corrente de saída. Tomando a resistência de carga como baixa, a potência dissipada por Q_{EXT} é:

$$P_{MAX} = (+V_{CC})I_{FS} \quad (6.2)$$

O tipo do transistor e a dissipação de calor devem ser escolhidos de acordo com a dissipação máxima de potência, para evitar o superaquecimento.

6.9 ALCANCE DA TENSÃO DE ENTRADA

O amplificador operacional A1 pode ser danificado, caso sua porta não inversora, puxa mais que 0.5 V abaixo do terra comum(0 V). Isto pode ocorrer se os pinos de

entrada 3, 4 ou 5 forem conduzidos por um amplificador operacional que tenha um fator de amplificação negativo em condições anormais. A tensão de entrada de A1 é;

$$V_{A1} = \frac{(V_{RefIN})}{16} + \frac{(V_{IN1})}{4} + \frac{(V_{IN2})}{2} \quad (6.3)$$

Esta tensão não deve chegar a valores menores que -0.5 V. Caso necessário, um diodo pode ser ligado na entrada negativa e no terra comum, para fixar a tensão de entrada.

6.10 TERRA COMUM

Deve se ter uma atenção maior nas conexões dos terras comuns, pois todas as conexões do terra dever ser unidas em um ponto próximo ao pino 2 do XTR110. A única exceção é a realimentação I_{OUT} que pode ser conectada em qualquer ponto que não tenha o pino 2 como referência.

6.11 TENSÃO DE REFERÊNCIA

A tensão de referência é precisamente regulada no pino 12 ($V_{RefSENSE}$). Para manter a precisão, qualquer carga incluindo o pino 3 deve ser conectada a este ponto. O circuito da figura 11 mostra o ajuste da tensão de referência.

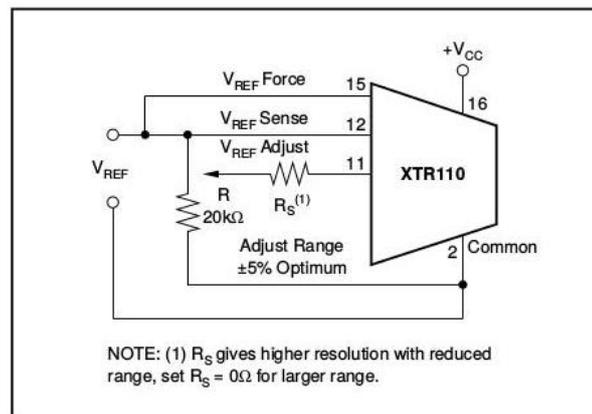


Figura 11 – Ajuste opcional na tensão de referência.

A corrente interna de referência do XTR110 é de 10 mA. Este valor pode ser estendido, caso seja necessário, adicionando um transistor NPN externo como é mostrado na figura 12

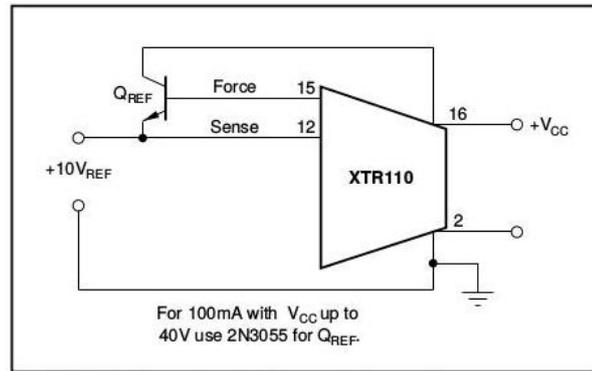


Figura 12 – Aumento da corrente interna.

6.12 AJUSTE DO OFFSET(ZERO)

O *offset* da corrente, pode ser modificado usando um potenciômetro R1, como é mostrado na figura 13. Assim, basta ajustar a tensão de entrada para zero e em seguida, ajustar R1 para que na saída apareça 4 mA.

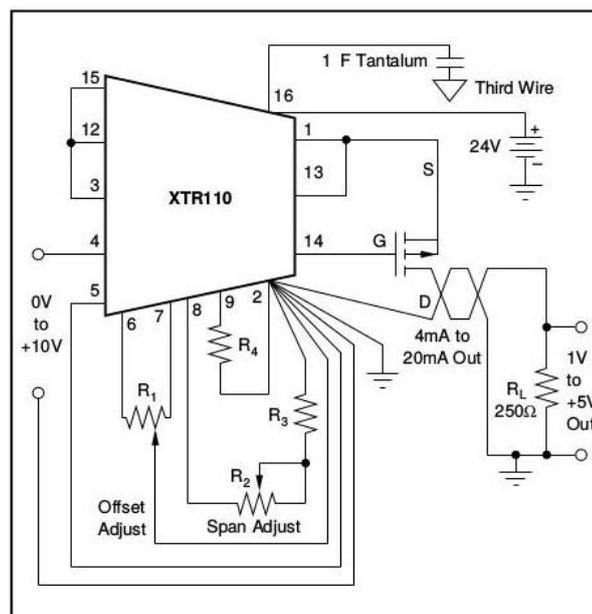


Figura 13 – Offset e ajuste do Span, para tensões de entrada entre 0 V a +10 V e saída de 4 mA a 20 mA.

Para spans a partir de 0 mA, é recomendado seguir o seguinte procedimento: definir a entrada com um valor bem baixo, próximo a zero e, em seguida, ajustar R1 para se obter a corrente de saída adequada. Quando a entrada for zero a saída também será zero. Nas figuras 14 e 15 são apresentados graficamente, como o *offset* é ajustado.

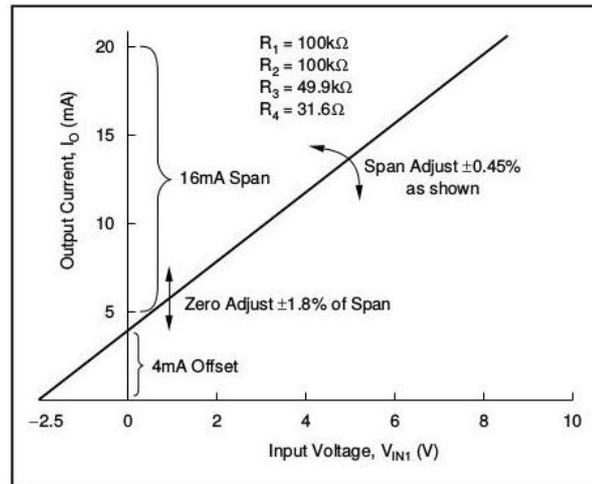


Figura 14 – Zero e Span para entradas de 0 V a +10 V e saída de 4 mA a 20 mA.

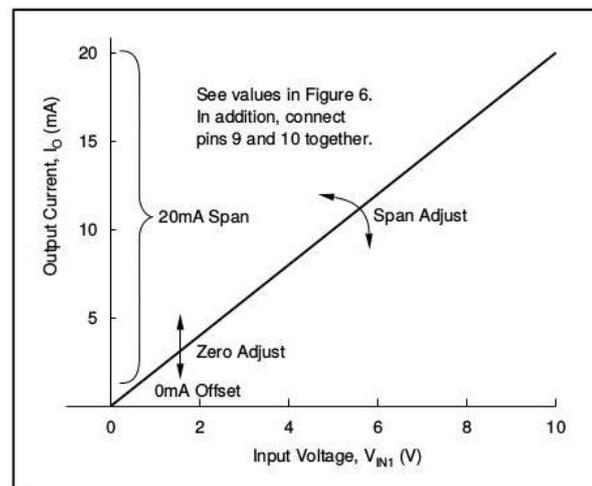


Figura 15 – Zero e Span para entradas de 0 V a +10 V e saída de 4 mA a 20 mA.

6.13 AJUSTE DO SPAN(ALCANCE)

O ajuste do *Span* na corrente de saída é feito utilizando um potenciômetro R2, como mostrado na figura 13. Para o circuito apresentado, é definida a tensão de entrada como +10 V e o potenciômetro ajustado para o valor na saída de 20 mA. As figuras 14 e 15 mostram graficamente esse ajuste.

Os valores de R2, R3 e R4 para ajustar o *span* são escolhidos da seguinte maneira: R4 em série para diminuir ligeiramente o *span*, após isso, escolher R2 e R3 para aumentar o *span* para que ele seja ajustado sobre o valor central.

6.14 EXTENSÃO DO SPAN

Para *spans* além de 40 mA, a resistência interna de 50Ω pode ser substituída por uma resistência externa ligada entre os pinos 13 e 16. O valor dessa resistência pode ser calculado a partir da equação mostrada abaixo:

$$R_{EXT} = R_9(Span_{OLD}/Span_{NEW})$$

6.15 APLICAÇÕES TÍPICAS

O XTR110 é ideal para uma grande variedade de aplicações que requerem baixo ruído em sua transmissão. A precisão de +10 V na tensão de referência, pode ser utilizada para alimentar pontes de transdutores. Escalas selecionáveis o tornam muito útil como uma fonte de corrente programável de precisão. Seu compacto design e baixo custo permite uma versatilidade com o mínimo de componentes externos. As figuras 16, 17 E 18 mostram aplicações típicas do XTR110:

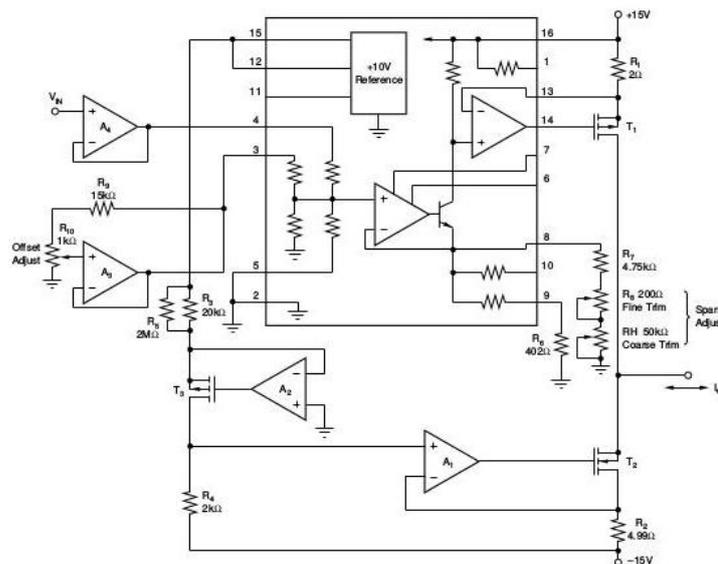


Figura 16 – +-200 mA de corrente.

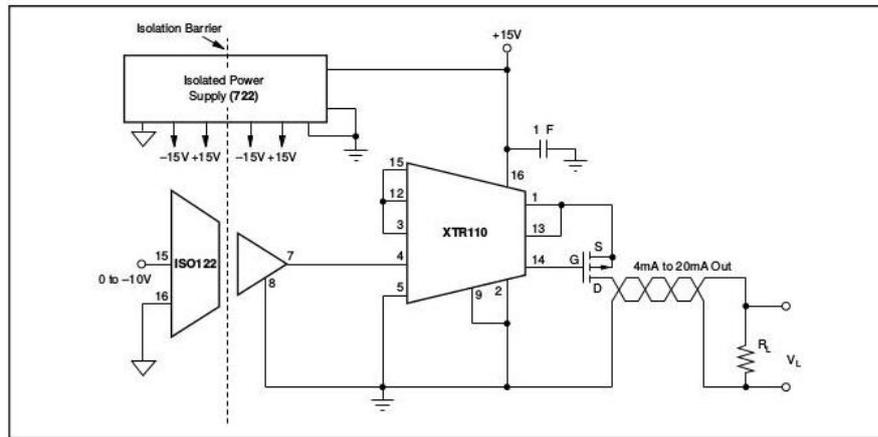


Figura 17 – Canal isolado de 4 mA a 20 mA.

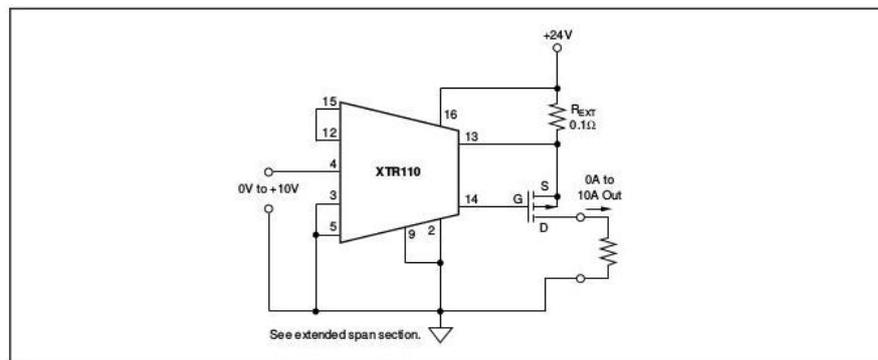


Figura 18 – Conversor de tensão-em-corrente de 0 mA a 10 mA.

6.16 DIMENSIONAMENTO DOS MODELOS DE XTR110

Abaixo são mostradas as dimensões dos possíveis encapsulamentos do XTR110.

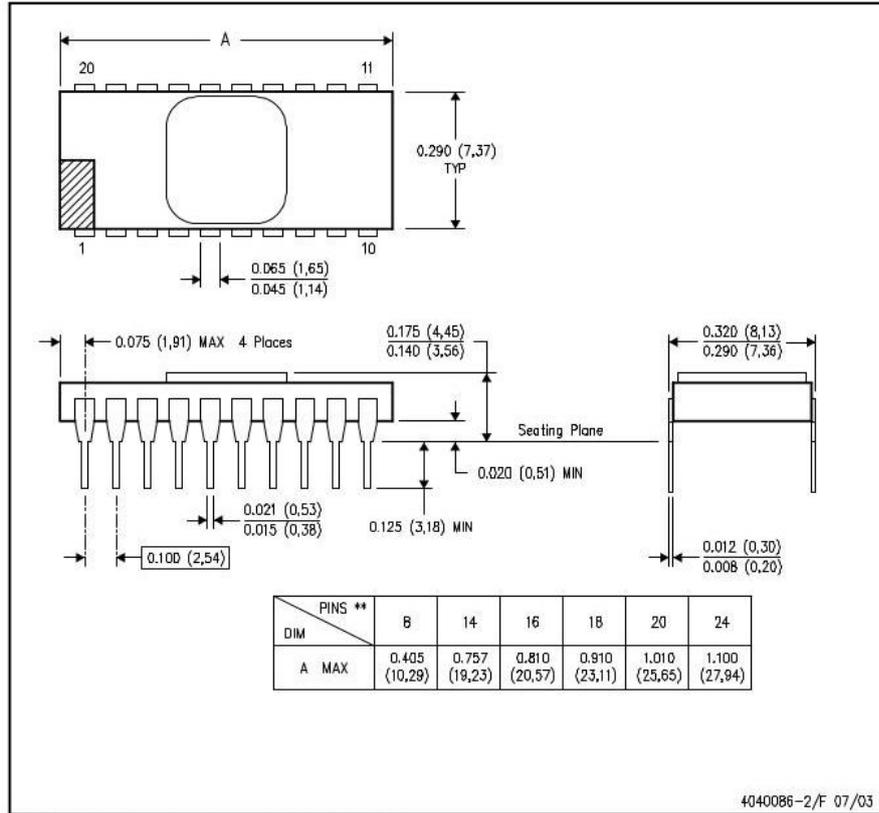


Figura 19 – DIP - Dual In-line Package 16 pinos cerâmico.

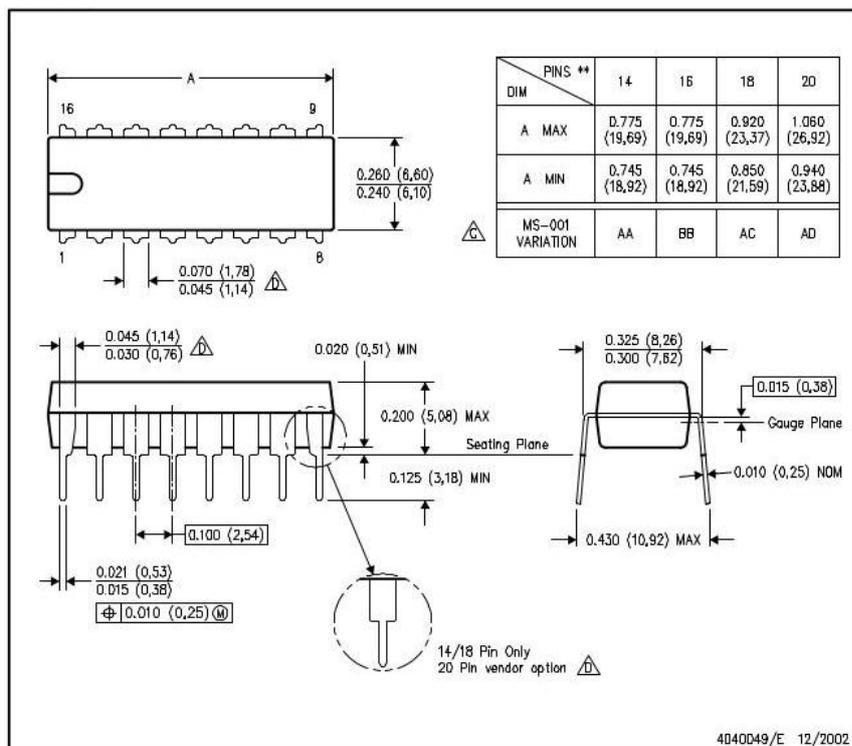


Figura 20 – DIP - Dual In-line Package 16 pinos plástico.

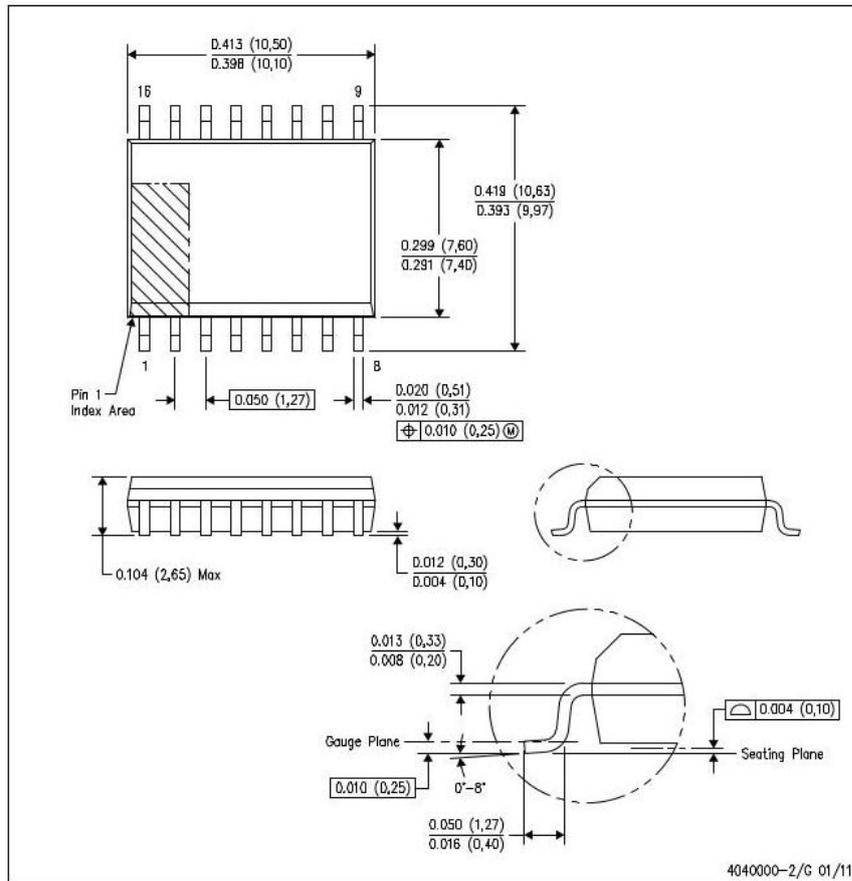


Figura 21 – SOL - Small outline large de 16 pinos.

7 XTR300

7.1 DESCRIÇÃO

O XTR300 é um driver de saída desenvolvido para o uso industrial para a realização de testes e aplicações de controle de processo. Ele pode ser configurado para que tenha uma saída de tensão ou corrente. Nenhuma resistor de desvio externo é necessário, são necessários apenas resistores de ajuste de ganho externos e um capacitor de compensação.

Tem uma flexibilidade por possuir canais de drive e receptor independentes. Seu amplificador de Instrumentação pode ser utilizado como sensor de tensão ou como um canal de medição de alta tensão e alta impedância. No modo de saída de tensão,

A capacidade de seleção de saída digital, em conjunto com os sinalizadores de erro, fazem uma possível configuração e solução de problemas. Falha saída e na entrada do amplificador de Instrumentação, assim como altas temperaturas são indicadas pelos sinalizadores de erro. Os pinos de monitorização contínua fornecer *feedback* sobre a tensão de carga ou de impedância.

O XTR300 é projetado para temperaturas entre -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$ e para tensões de alimentação de até 40V.

Por ser desenvolvido apenas no encapsulamento VQFN, a facilidade de testes rápidos em *protoboards* não é possível, sendo esse um ponto negativo do XTR300.

7.2 CARACTERÍSTICAS

- Uso selecionável: tensão ou saída de corrente;
- Alimentação de até 40 V;
- Tensão de saída V_{OUT} : ± 10 V, podendo ir de $\pm 17,5$ V à ± 20 V;
- Corrente de saída I_{OUT} : ± 20 mA, podendo ir até ± 24 mA;
- Proteção térmica;
- Proteção de sobrecorrente;

7.3 APLICAÇÕES

- Cruzamento de conectores industriais;

- Alta tensão de saída/entrada industrial;
- 3 sensores de corrente ou tensão de saída;

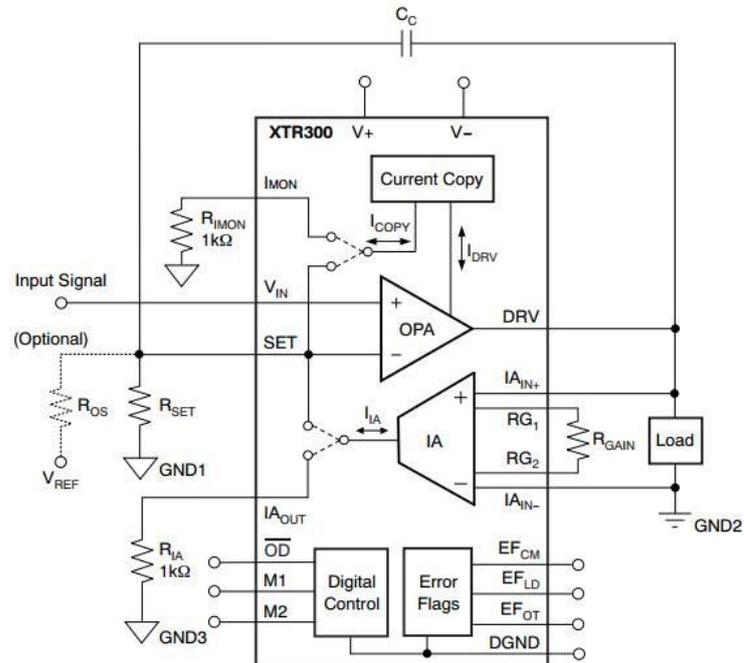


Figura 22 – Diagrama básico do XTR300.

7.4 POSSÍVEIS CONFIGURAÇÕES DO XTR300 E SUAS RESPECTIVAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

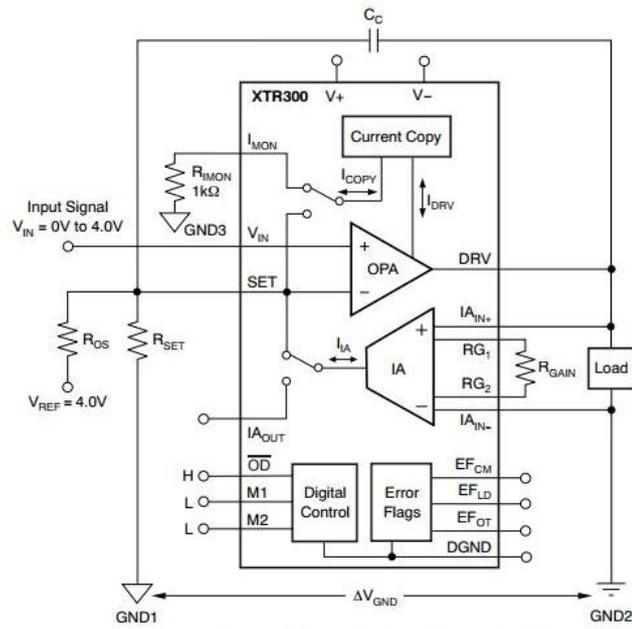


Figura 23 – Circuito padrão para o modo de saída de tensão.

$$V_{OUT} = \frac{R_{GAIN}}{2} \left(\frac{V_{IN}}{R_{SET}} + \frac{V_{IN} - V_{REF}}{R_{OS}} \right) \quad (7.1)$$

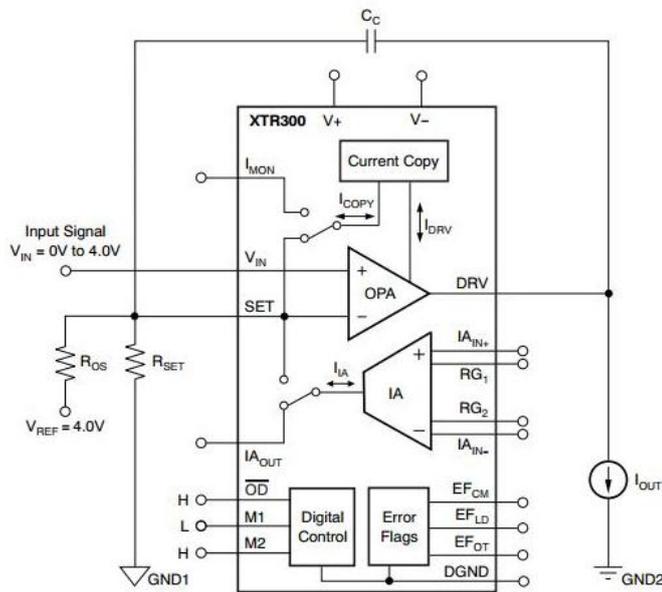


Figura 24 – Circuito padrão para o modo de saída de corrente.

$$I_{OUT} = 10 \left(\frac{V_{IN}}{R_{SET}} + \frac{V_{IN} - V_{REF}}{R_{OS}} \right) \quad (7.2)$$

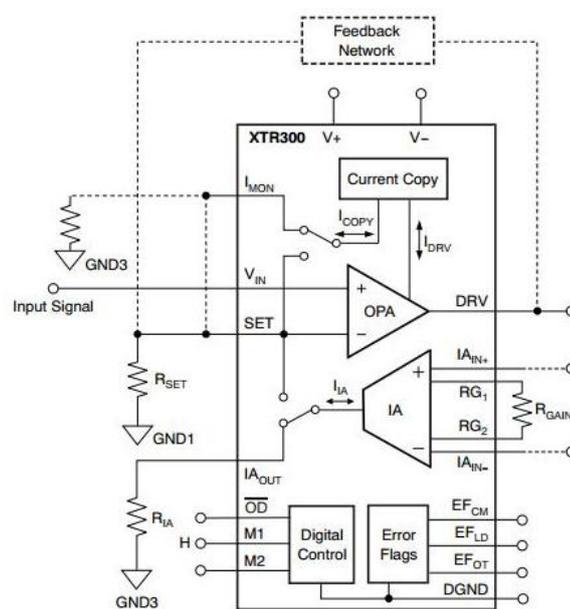


Figura 25 – Circuito padrão para seleção externa do modo de saída.

8 XTR111

8.1 DESCRIÇÃO

Assim como o XTR110, o XTR111 também é um preciso conversor de tensão em corrente, projetado para valores na faixa de 0 mA a 20 mA ou 4 mA a 20 mA, sendo que esses valores podem chegar a 36 mA. A relação entre a tensão de entrada e corrente de saída é realizada por uma única resistência R_{SET} . O circuito do XTR111 pode ser alterado para que ao invés de fornecer uma saída de corrente, ele forneça uma saída de tensão.

Acomplando um transistor MOSFET do tipo P, se tem a garantida uma alta resistência de saída. O ajuste de 3 V até 15 V do regulador da saída fornece uma tensão de alimentação para um circuito adicional.

O XTR111 é desenvolvido nos encapsulamentos MSOP e DFN, que são circuitos para montagem em placas de circuito impresso, de tal forma que a dificuldade apresentada pelo XTR300 quanto a implementação em bancada, se faz comum ao XTR111.

8.2 CARACTERÍSTICAS

- Opera nas faixa de entrada/saída de: 0 mA a 20 mA, 4 mA a 20 mA , 25 mA a 5 mA e também com saídas de tensão;
- Funcionamento com alimentação simples;
- Amplos valores de alimentação: de 7 V a 44 V;
- Indicação de erro na saída;
- Regulador de tensão ajustável; de 3 V a 15 V;
- Fonte de corrente controlada por tensão;
- Saída de corrente ou tensão sistemas de sensores.

8.3 CONFIGURAÇÕES DO XTR111 E SUAS RESPECTIVAS FUNÇÕES DE TRANFERÊNCIA

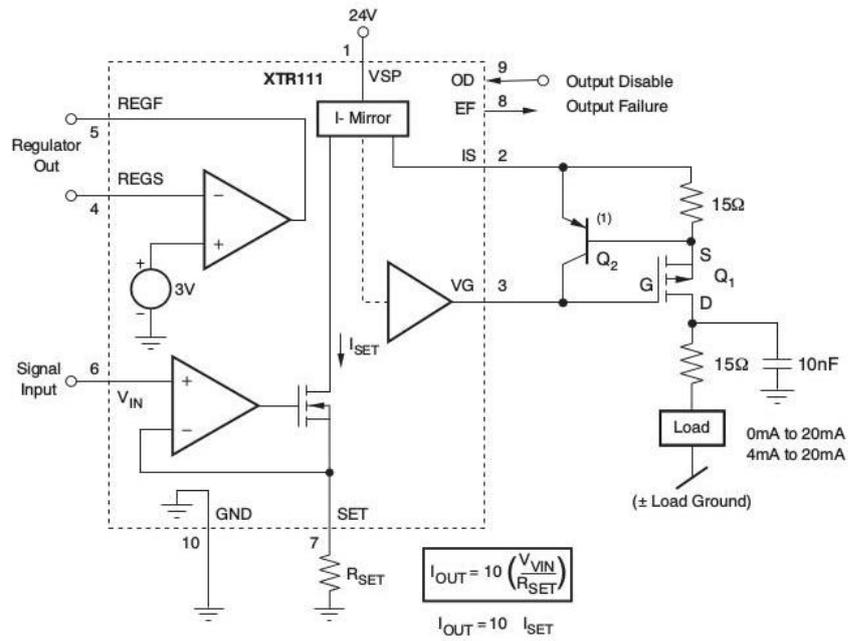


Figura 26 – Circuito padrão do XTR111.

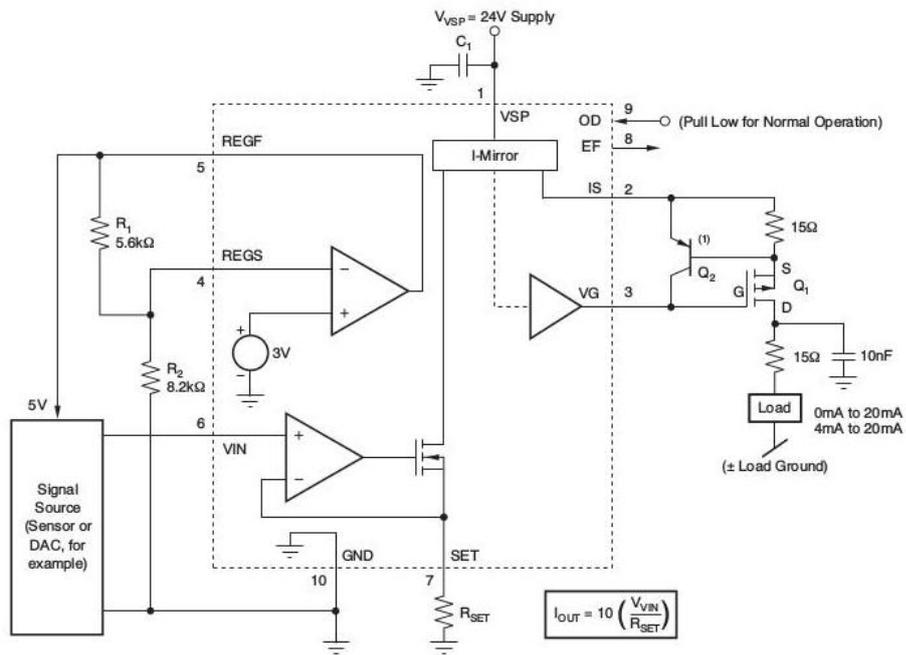


Figura 27 – Conexões básicas para uma entrada de 0 V a 5 V e uma saída de 0 mA a 20 mA.

9 RESULTADOS

9.1 TESTES REALIZADOS COM O XTR110

Foram realizados testes no XTR110 para tensão de entrada de $0 - 5V$, de modo que foram utilizadas diferentes valores de resistência de carga.

Os valores dessas medidas de corrente e suas respectivas entradas de tensão são apresentados na tabela 2, assim como suas respectivas resistências de carga.

V_{in} [V]	$I_{R=450}$ [mA]	$I_{R=500}$ [mA]	$I_{R=650}$ [mA]	$I_{R=800}$ [mA]	$I_{R=1k}$ [mA]
0.500	1.949	1.980	2.060	1.955	2.070
1.000	3.980	4.010	4.080	3.990	4.060
1.500	5.970	5.990	6.060	5.960	6.040
2.00	7.950	8.010	8.050	7.950	8.020
2.50	9.960	9.960	10.01	9.92	9.99
3.00	11.92	11.95	11.97	11.87	11.95
3.50	13.86	13.97	13.94	13.80	13.86
4.00	15.80	15.86	15.83	15.73	15.72
4.50	17.81	17.83	17.80	17.64	17.58
5.00	19.75	19.77	19.73	19.58	18.55

Tabela 2 – Correntes de saída medidas com diferentes valores de resistência de carga.

A figura 28 mostra o gráfico do comportamento do XTR110 , de acordo com os valores mostrados da tabela 2 , incluindo os valores de resistência de carga.

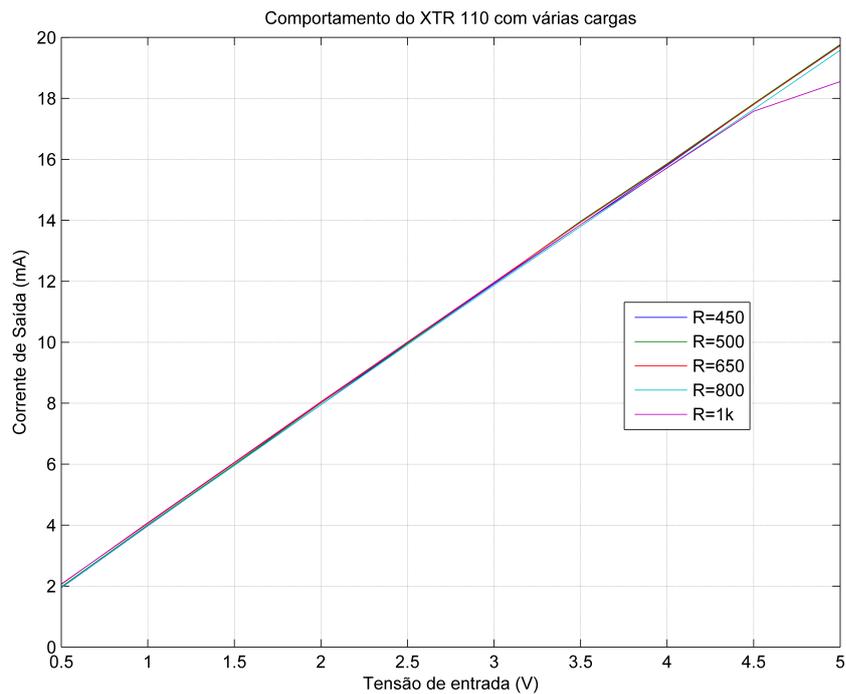


Figura 28 – Comportamento da corrente de saída do XTR110 com várias cargas.

De acordo com a figura 28 é possível notar que a corrente de saída se comporta linearmente, assim como a baixa variância ao longo das curvas traçadas. Quando é utilizado uma carga de $1\text{ k}\Omega$ e um tensão próxima a 5 V , vemos que a corrente de saída sofre uma saturação.

Para analisar as medidas, obteve-se a média, variância e desvio padrão destas. Com esses dados em mãos, foram obtidos os intervalos de confiança, considerando um Índice de confiança de 99%, para as medidas das correntes, ou seja, para qualquer outro valor de impedância de carga utilizado, existe 99% de chances de a corrente medida estar dentro deste intervalo de confiança. Na figura 29, pode-se ver os valores das médias das medidas, com suas respectivas barras de confiança obtidas. É possível notar também que o alto grau de confiabilidade do dispositivo proposto, pois alguns intervalos de confiança não ultrapassam a ordem de *microamperes*. Também é possível notar que, quando a entrada de aproxima dos 5 V , o intervalo de confiança aumenta, ou seja, o sistema é menos preciso na entrega de corrente, porém ainda suficientemente confiável. Com isso, pode-se dizer que a esta última medida tem a maior variância amostral entre as medidas realizadas, ou seja, os pontos medidos estão mais separados da média que nas outras medidas. Isso se deve, como já mencionado, à saturação da corrente com a carga de $1\text{ K}\Omega$ próxima aos 5 V , fazendo com que a corrente nesse ponto, com esse valor de impedância, se afaste dos valores obtidos para impedâncias menores. (SANTOS, 2015)

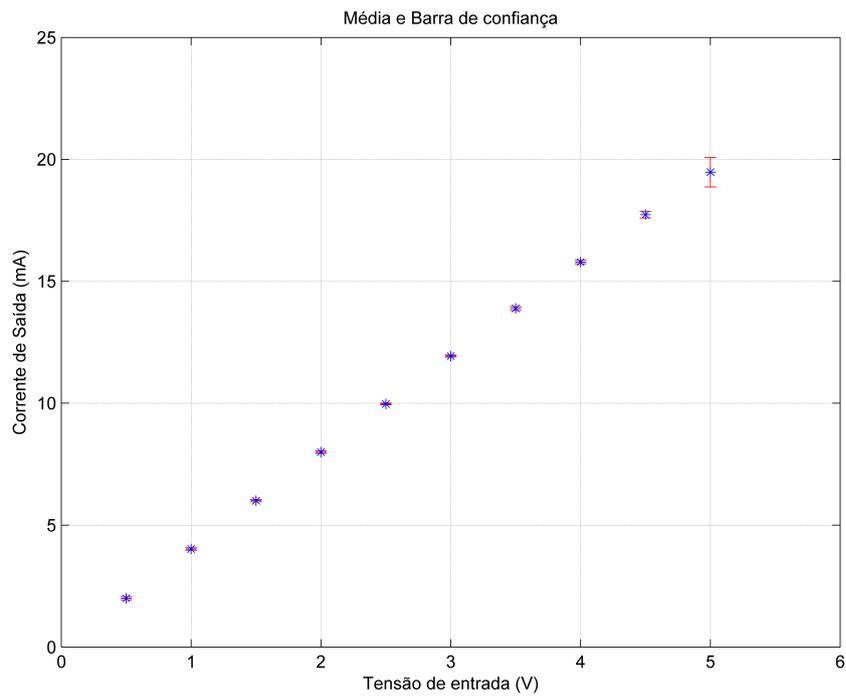


Figura 29 – Média e Barra de confiança com 99% de confiança.

A tabela (3) mostra os valores obtidos da tensão de entrada e da média e do desvio padrão da corrente de saída medida.

V_{in} [V]	média [mA]	Desvio padrão [mA]
0.500	2.003	0.0581
1.000	4.02	0.0439
1.500	6.00	0.0439
2.00	7.99	0.0445
2.50	9.97	0.0342
3.00	11.93	0.0390
3.50	13.89	0.0684
4.00	15.79	0.0614
4.50	17.73	0.1139
5.00	19.48	0.5230

Tabela 3 – Tensão de entrada, média e desvio padrão de saída.

9.2 SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O XTR111

Abaixo na figura 30 é apresentado o circuito do XTR111 implementado no simulador *TINA*.

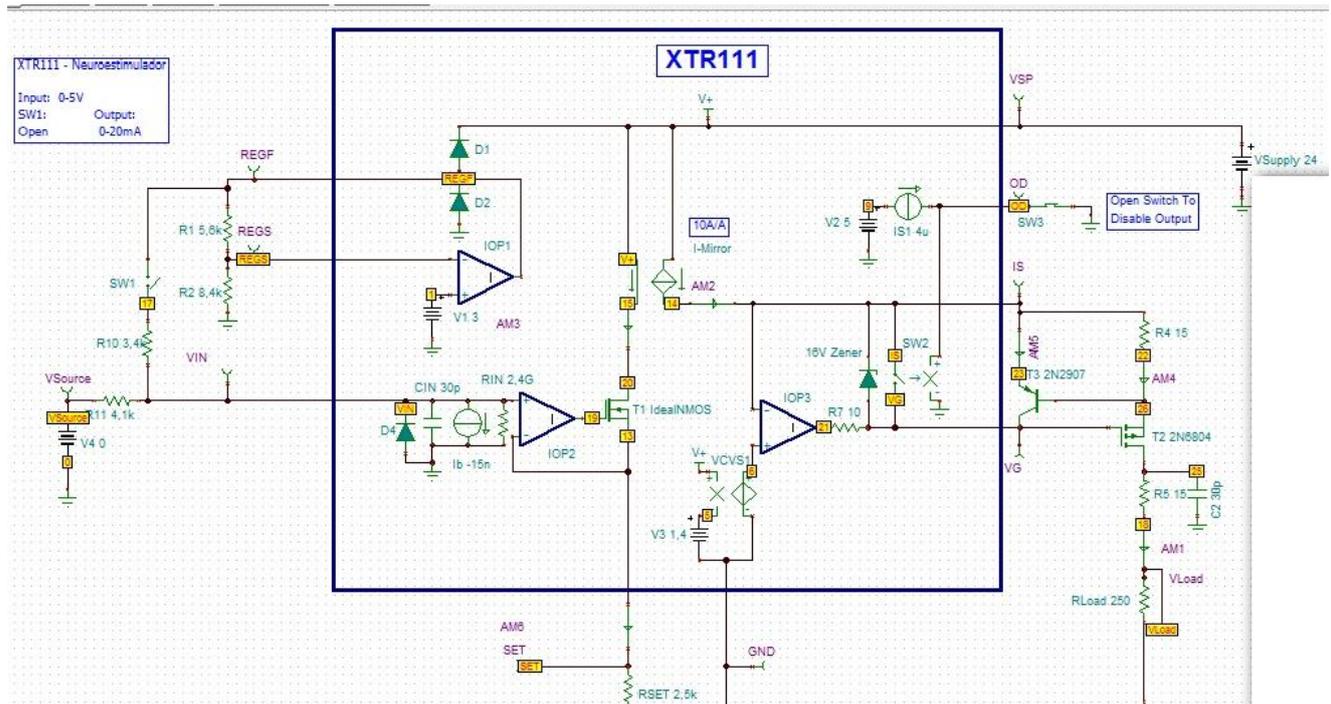
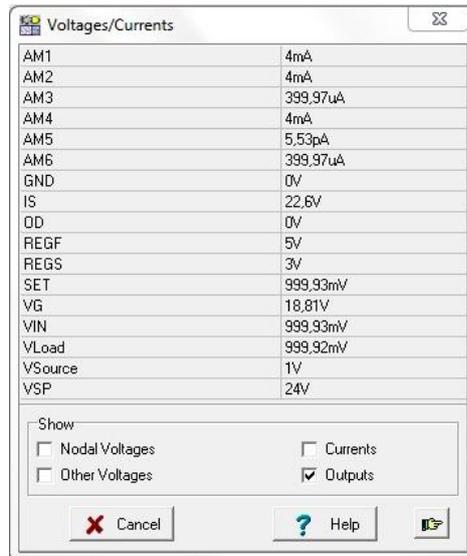


Figura 30 – Esquemático do XTR111 no *TINA*.

Com essa simulação, foram encontrados os valores esperados de corrente na saída, tendo uma entrada que varie de 0 a 5 V, como é mostrado abaixo.

Node	Value
AM1	308.13nA
AM2	326.83nA
AM3	32.68nA
AM4	308.13nA
AM5	3.96pA
AM6	32.68nA
GND	0V
IS	22.6V
OD	0V
REGF	5V
REGS	3V
SET	81.71uW
VG	18.9V
VIN	81.71uW
VLoad	77.03uW
VSource	0V
VSP	24V

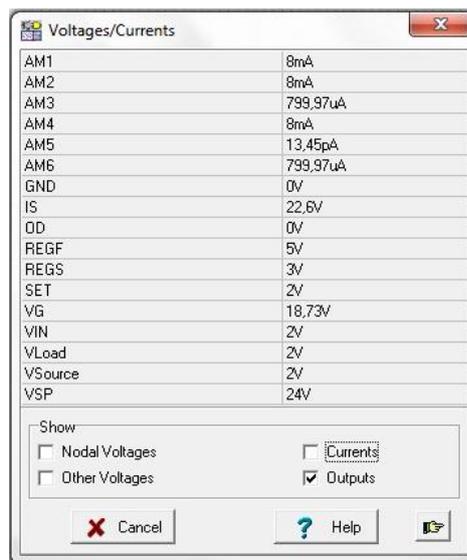
Figura 31 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 0 V a saída obtida foi de 308,13 nA.



Node	Value
AM1	4mA
AM2	4mA
AM3	399,97uA
AM4	4mA
AM5	5,53pA
AM6	399,97uA
GND	0V
IS	22,6V
OD	0V
REGF	5V
REGS	3V
SET	999,93mV
VG	18,81V
VIN	999,93mV
VLoad	999,92mV
VSource	1V
VSP	24V

Nodal Voltages Currents
 Other Voltages Outputs

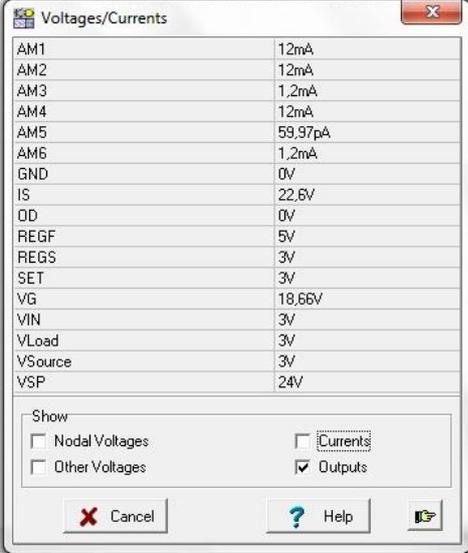
Figura 32 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 1 V a saída obtida foi de 4 mA.



Node	Value
AM1	8mA
AM2	8mA
AM3	799,97uA
AM4	8mA
AM5	13,45pA
AM6	799,97uA
GND	0V
IS	22,6V
OD	0V
REGF	5V
REGS	3V
SET	2V
VG	18,73V
VIN	2V
VLoad	2V
VSource	2V
VSP	24V

Nodal Voltages Currents
 Other Voltages Outputs

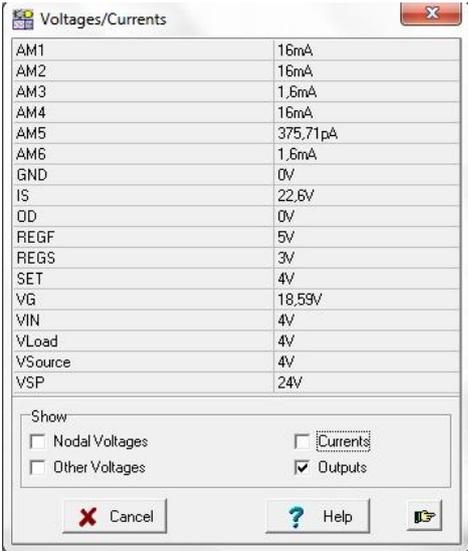
Figura 33 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 2 V a saída obtida foi de 8 mA.



Node	Value
AM1	12mA
AM2	12mA
AM3	1,2mA
AM4	12mA
AM5	59,97pA
AM6	1,2mA
GND	0V
IS	22,6V
OD	0V
REGF	5V
REGS	3V
SET	3V
VG	18,66V
VIN	3V
VLoad	3V
VSource	3V
VSP	24V

Buttons: Nodal Voltages, Other Voltages, Currents, Outputs, Cancel, Help

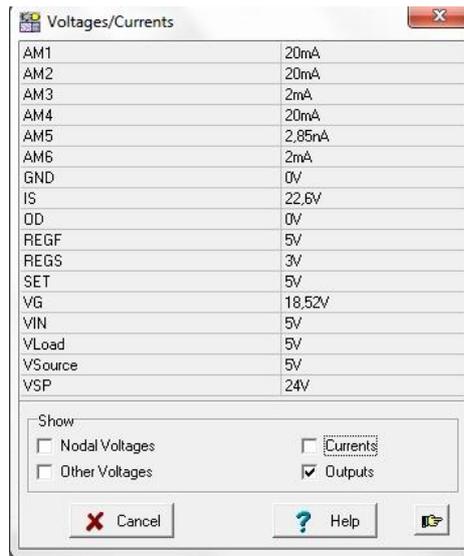
Figura 34 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 3 V a saída obtida foi de 12 mA.



Node	Value
AM1	16mA
AM2	16mA
AM3	1,6mA
AM4	16mA
AM5	375,71pA
AM6	1,6mA
GND	0V
IS	22,6V
OD	0V
REGF	5V
REGS	3V
SET	4V
VG	18,59V
VIN	4V
VLoad	4V
VSource	4V
VSP	24V

Buttons: Nodal Voltages, Other Voltages, Currents, Outputs, Cancel, Help

Figura 35 – tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 4 V a saída obtida foi de 16 mA.



AM1	20mA
AM2	20mA
AM3	2mA
AM4	20mA
AM5	2,85mA
AM6	2mA
GND	0V
IS	22,6V
OD	0V
REGF	5V
REGS	3V
SET	5V
VG	18,52V
VIN	5V
VLoad	5V
VSource	5V
VSP	24V

Show
 Nodal Voltages Currents
 Other Voltages Outputs

Figura 36 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR111. Para um entrada de 5 V a saída obtida foi de 20 mA.

Abaixo é mostrado o gráfico de tensão e corrente do XTR111.

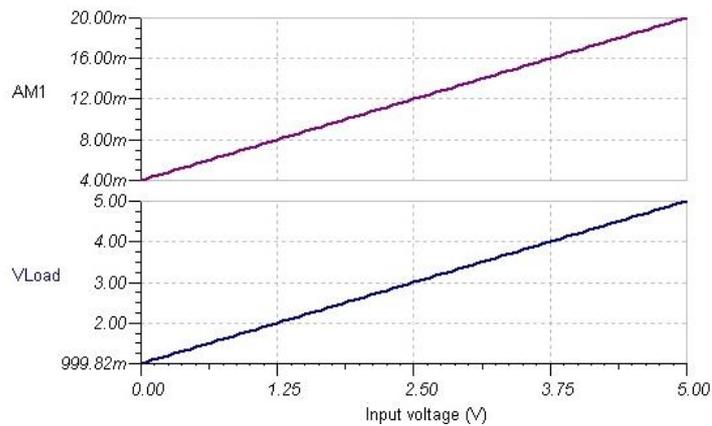


Figura 37 – Gráfico com os valores obtidos na simulação do XTR111.

9.3 SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O XTR110

9.3.1 LTSpice

Abaixo na figura 43 é apresentado o circuito implementado no simulador *LTSpice*.

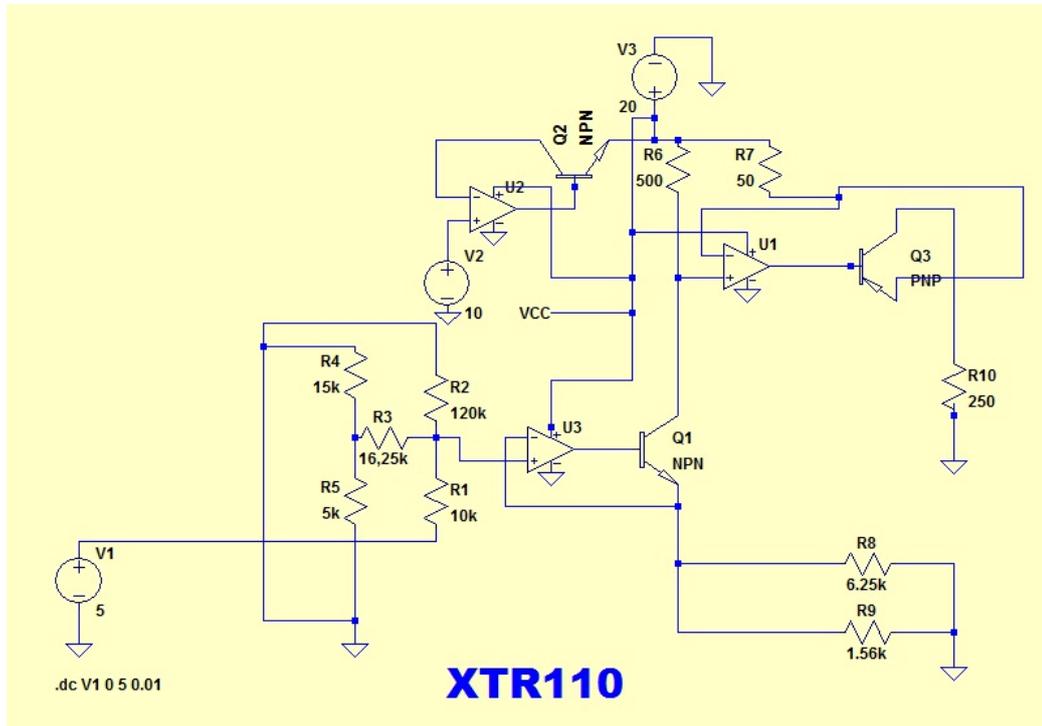


Figura 38 – Esquemático do XTR110 no *LTSpice*.

Após essa implementação foram realizadas simulações com diferentes valores de resistência. Abaixo são mostrados os gráficos obtidos com cada resistência. É possível notar que nas simulações os valores de corrente ficaram um pouco elevados se comparados com os gráficos da figura 28. Mas esses valores mostram a diferença entre o teste em bancada e a simulação feita no *LTSpice*, pois é utilizado um modelo de amplificador operacional ideal, gerando assim diferenças consideráveis entre as análises.

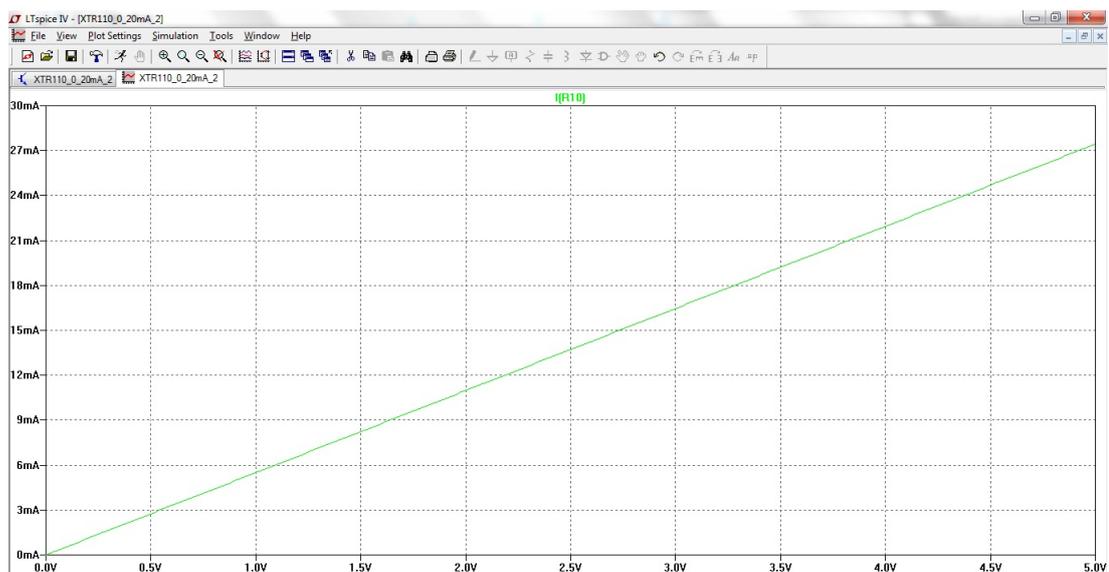


Figura 39 – Gráfico do XTR110 simulado no *LTSpice* para uma carga de 400Ω .

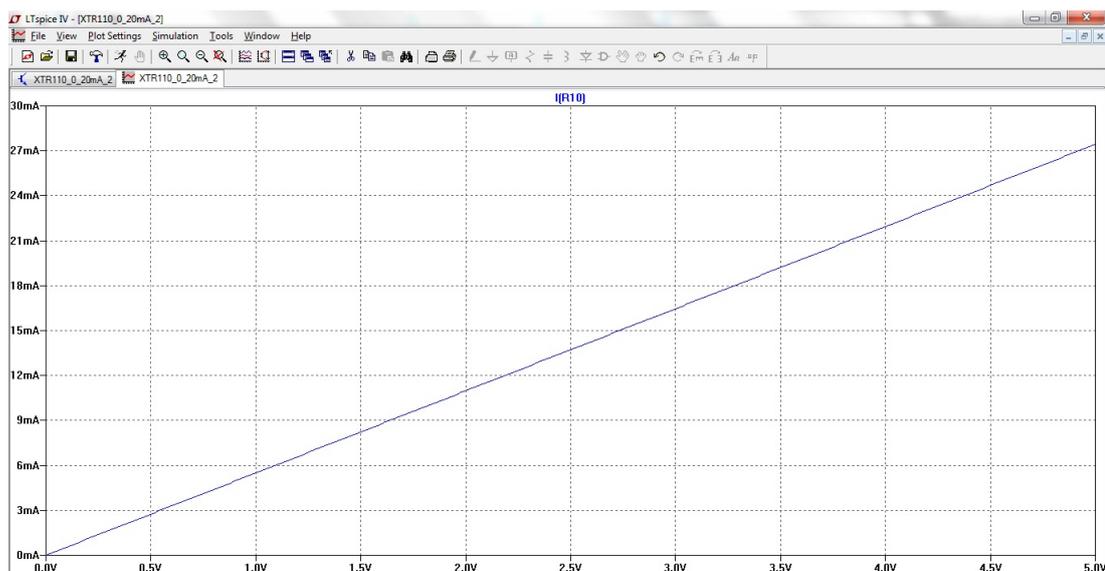


Figura 40 – Gráfico do XTR110 simulado no *LTSpice* para uma carga de 500Ω .

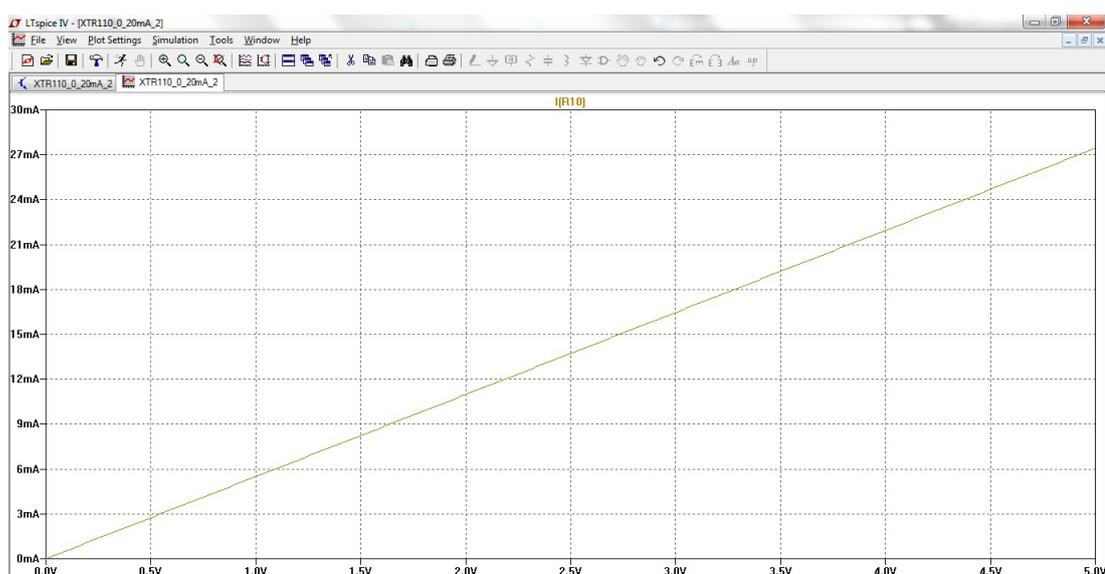


Figura 41 – Gráfico do XTR110 simulado no *LTSpice* para uma carga de 650Ω .

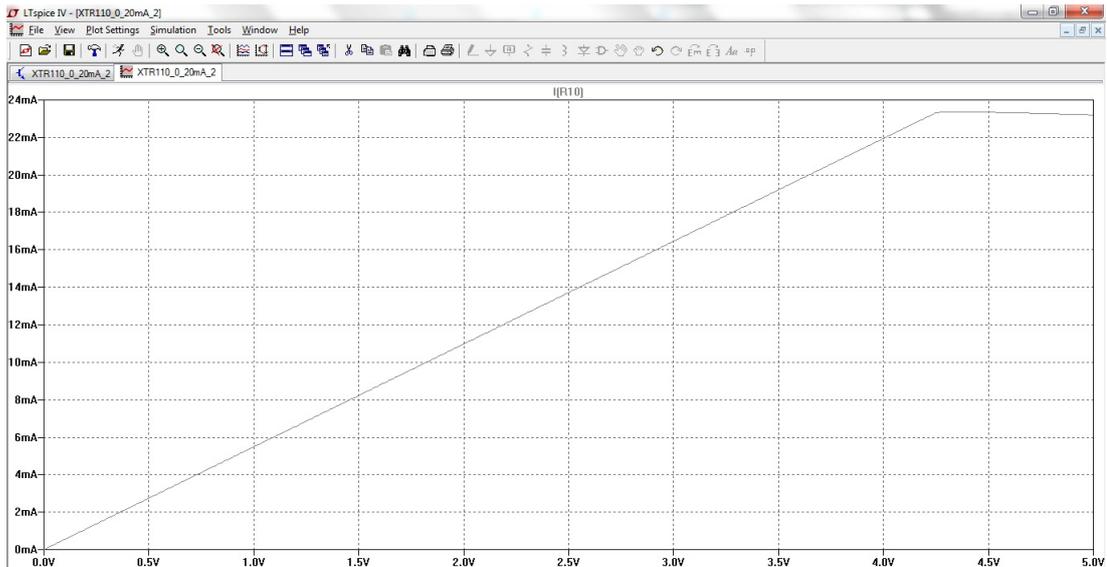


Figura 42 – Gráfico do XTR110 simulado no *LTSpice* para uma carga de 800Ω..

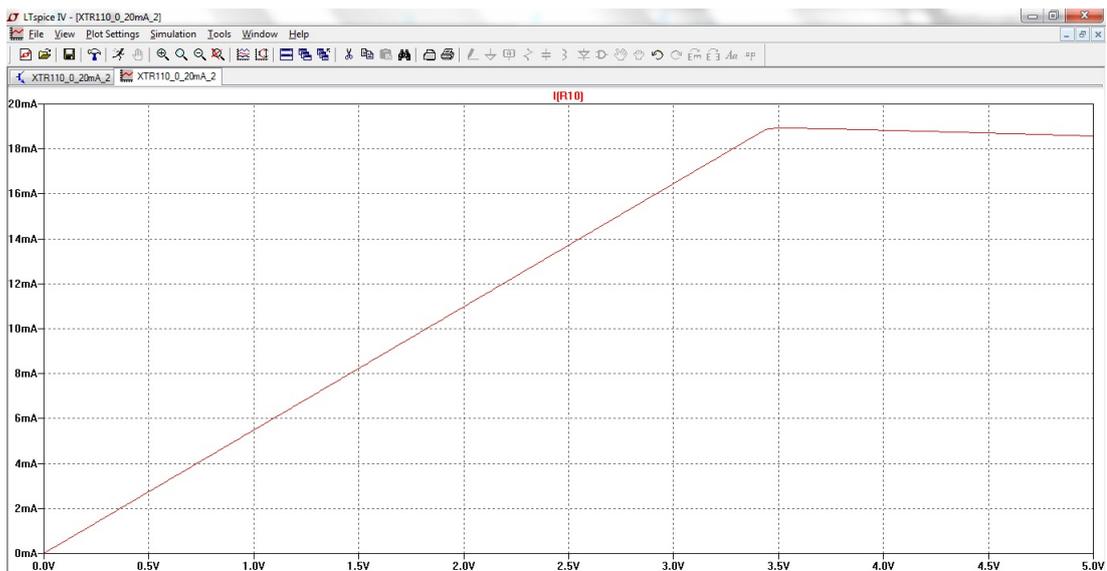


Figura 43 – Gráfico do XTR110 simulado no *LTSpice* para uma carga de 1 KΩ..

Os valores da corrente para um tensão de 5 V passaram de 19,5 mA para cerca de 27 mA para as cargas de 400Ω, 500Ω e 650 Ω.

Já para a carga de 800 Ω a corrente saturou para um tensão de entrada de 4,25 V.

E para a carga de 1 kΩ a saturação ocorreu por volta de 3,45 V.

9.3.2 TINA

Abaixo na figura 44 é apresentado o circuito do XTR110 implementado no simulador *TINA*.

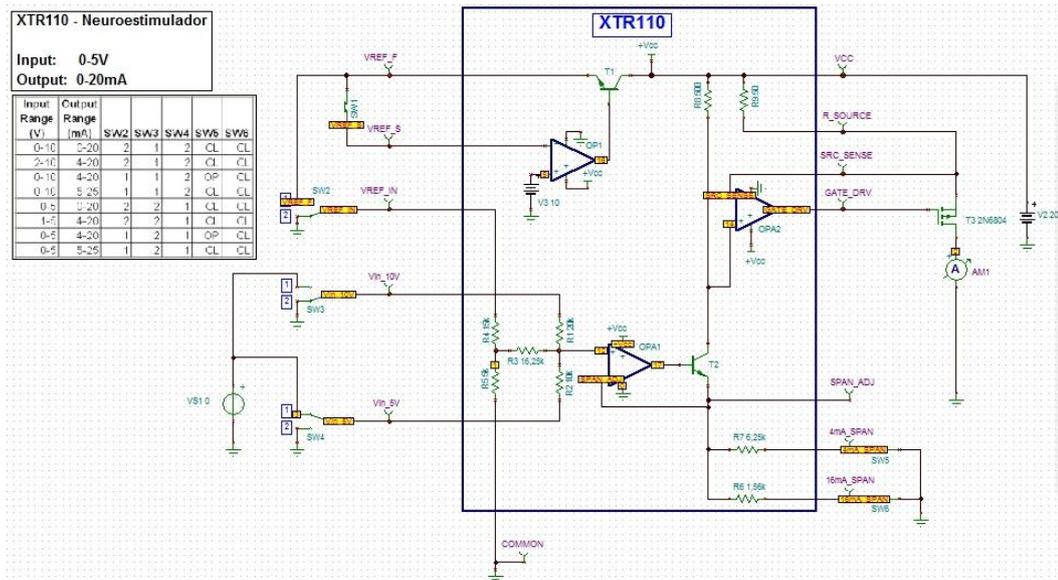
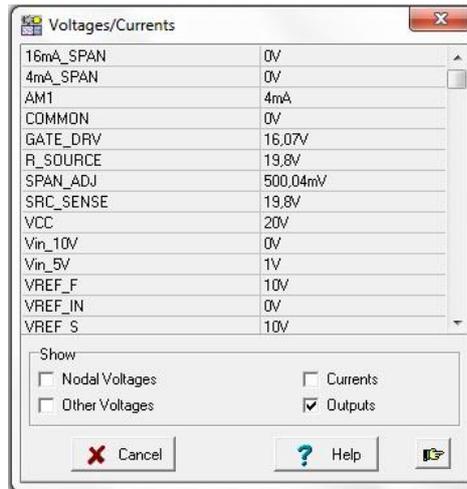


Figura 44 – Esquemático do XTR110 no TINA.

Com essa simulação, foram encontrados os valores esperados de corrente na saída, tendo uma entrada que varie de 0 a 5 V, como é mostrado abaixo.

Node	Value
16mA_SPAN	0V
4mA_SPAN	0V
AM1	2.22uA
COMMON	0V
GATE_DRV	16.3V
R_SOURCE	20V
SPAN_ADJ	212.6uV
SRC_SENSE	20V
VCC	20V
Vin_10V	0V
Vin_5V	0V
VREF_F	10V
VREF_IN	0V
VREF_S	10V

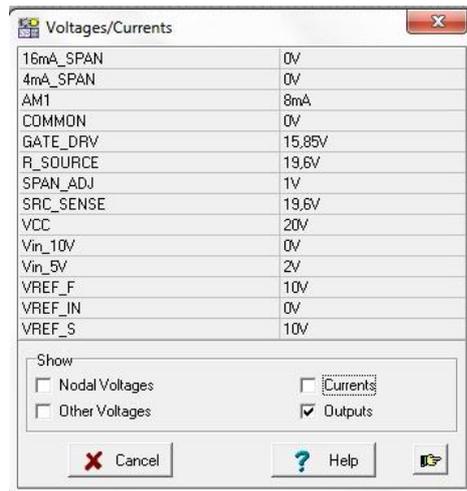
Figura 45 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 0 V a saída obtida foi de 2,22 uA.



Variable	Value
16mA_SPAN	0V
4mA_SPAN	0V
AM1	4mA
COMMON	0V
GATE_DRV	16,07V
R_SOURCE	19,6V
SPAN_ADJ	500,04mV
SRC_SENSE	19,6V
VCC	20V
Vin_10V	0V
Vin_5V	1V
VREF_F	10V
VREF_IN	0V
VREF_S	10V

Show
 Nodal Voltages Currents
 Other Voltages Outputs

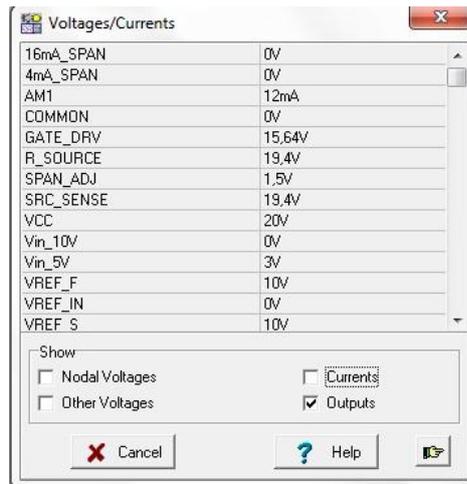
Figura 46 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 1 V a saída obtida foi de 4 mA.



Variable	Value
16mA_SPAN	0V
4mA_SPAN	0V
AM1	8mA
COMMON	0V
GATE_DRV	15,85V
R_SOURCE	19,6V
SPAN_ADJ	1V
SRC_SENSE	19,6V
VCC	20V
Vin_10V	0V
Vin_5V	2V
VREF_F	10V
VREF_IN	0V
VREF_S	10V

Show
 Nodal Voltages Currents
 Other Voltages Outputs

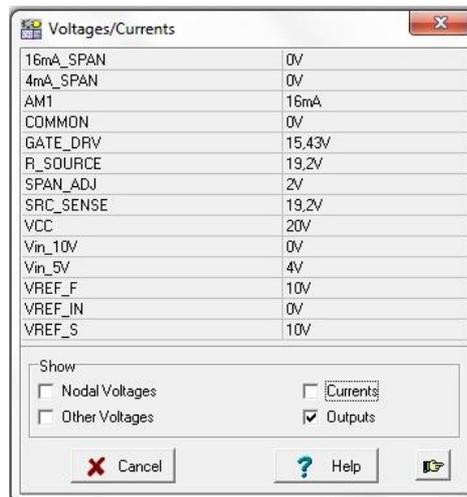
Figura 47 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 2 V a saída obtida foi de 8 mA.



The screenshot shows a window titled "Voltages/Currents" with a table of simulation results. The table lists various nodes and their corresponding values. Below the table, there are checkboxes for "Show" options: "Nodal Voltages", "Other Voltages", "Currents", and "Outputs". The "Outputs" checkbox is checked. At the bottom, there are buttons for "Cancel", "Help", and a printer icon.

Node	Value
16mA_SPAN	0V
4mA_SPAN	0V
AM1	12mA
COMMON	0V
GATE_DRV	15,64V
R_SOURCE	19,4V
SPAN_ADJ	1,5V
SRC_SENSE	19,4V
VCC	20V
Vin_10V	0V
Vin_5V	3V
VREF_F	10V
VREF_IN	0V
VREF_S	10V

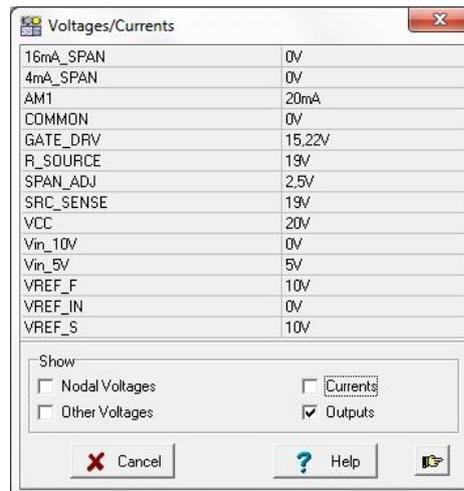
Figura 48 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 3 V a saída obtida foi de 12 mA.



The screenshot shows a window titled "Voltages/Currents" with a table of simulation results. The table lists various nodes and their corresponding values. Below the table, there are checkboxes for "Show" options: "Nodal Voltages", "Other Voltages", "Currents", and "Outputs". The "Outputs" checkbox is checked. At the bottom, there are buttons for "Cancel", "Help", and a printer icon.

Node	Value
16mA_SPAN	0V
4mA_SPAN	0V
AM1	16mA
COMMON	0V
GATE_DRV	15,43V
R_SOURCE	19,2V
SPAN_ADJ	2V
SRC_SENSE	19,2V
VCC	20V
Vin_10V	0V
Vin_5V	4V
VREF_F	10V
VREF_IN	0V
VREF_S	10V

Figura 49 – tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 4 V a saída obtida foi de 16 mA.



Node	Value
16mA_SPAN	0V
4mA_SPAN	0V
AM1	20mA
COMMON	0V
GATE_DRV	15.22V
R_SOURCE	19V
SPAN_ADJ	2.5V
SRC_SENSE	19V
VCC	20V
Vin_10V	0V
Vin_5V	5V
VREF_F	10V
VREF_IN	0V
VREF_S	10V

Figura 50 – Tabela com os valores das saídas do circuito do XTR110. Para um entrada de 5 V a saída obtida foi de 20 mA.

Os resultados tanto experimentais quanto virtuais foram satisfatórios, visto que os circuitos implementados no TINA (software desenvolvido pela Texas Instruments) consideram o uso de componentes ideais, sendo que as informações dos mesmos não são explicitas durante as simulações.

Mesmo havendo valores diferentes obtidos na parte física do XTR110 para os obtidos nos *softwares*, os valores encontrados são suficientes para a utilização desse CI para ser o conversor de tensão em corrente.

10 DISCUSSÕES

10.1 ESCOLHA ENTRE OS XTR'S

A escolha do XTR foi baseada tanto nos testes realizados em bancada, como os realizados em simuladores de circuitos, assim como nas características construtivas e de operação dos CI's. Por serem similares quanto a sua operação, esses XTR's possuem distintas diferenças que fazem com que um se destaque e atenda as características da relatada neuroestimulação.

Por se tratar de uma estimulação por corrente, n configurações e circuitos poderiam ser selecionados para a realização dessa tarefa, mas para reduzir as possibilidades, foram escolhidos para serem comparados apenas três CI's semelhantes para que entre esses um apenas fosse designado como o escolhido para o circuito final.

Considerando as especificações do XTR300, ele tem uma gama de possibilidades de uso, tendo como um dos pontos principais, a possibilidade de operar tanto com saída de tensão como de saída de corrente, mas por ser utilizado em configurações industriais e por ter uma configuração básica e com poucas informações, o mesmo não se adequa ao objetivo de desenvolver um neuroestimulador.

Já o XTR111 se aproxima mais do escopo do presente trabalho. Suas faixas de operação são condizentes com as especificações desejadas. Mas por ser um circuito mais robusto, e por não ter documentos que apresentem informações mais detalhadas, ele acaba tendo pontos negativos, dificultando a sua escolha para ser utilizado no neuroestimulador.

O XTR110 por sua vez, comparado com os outros dois XTR anteriormente apresentados, é o XTR que mais se aproxima aos valores requeridos para a estimulação por corrente. Seu diferencial quanto ao XTR111, vai muito além da sua documentação que deixa clara variadas configurações possíveis de serem implementadas utilizando o XTR110. Por possuir diferentes formas de encapsulamento e por ser um CI que necessite de poucos componentes no circuito externo, o mesmo satisfaz as necessidades e condições para a estimulação.

Referências

- Agência Brasil. Dor crônica afeta entre 15% e 40% dos brasileiros, dependendo da região do país. *Empresa Brasileira de Comunicação*, 2013. Citado na página 13.
- ALO, J. H. K. New trends in neuromodulation for the management of neuropathic pain. *Neurosurgery*, v. 50, p. 690–703; discussion 703–4, 2002. Citado na página 17.
- BAROLAT, G. Spinal Cord Stimulation for Chronic Pain Management. *Archives of Medical Research*, Elsevier, v. 31, p. 258–262, 2000. Citado na página 15.
- CARDOSO, S. H.; MELLO, L. C. de; SABBATINI, R. M. Como Funcionam as Células Nervosas. Parte II - O Potencial de Ação. *Cérebro & Mente*, 2000. Citado na página 15.
- EL-KHOURY, C. et al. Attenuation of neuropathic pain by segmental and supraspinal activation of the dorsal column system in awake rats. *Neuroscience*, IBRO, v. 112, p. 541–553, 2002. Citado na página 15.
- FARIA, U. D. C. *Implementação de um sistema de geração de marcha para pacientes com lesões medulares*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, 2006. Citado na página 14.
- GUYTON, A. C.; HALL, J. E. *Tratado de fisiologia Médica*. 11^a. ed. [S.l.]: Saunders Elsevier, 2006. Citado na página 15.
- HOLSHEIMER, J. *Which Neuronal Elements are Activated Directly by Spinal Cord Stimulation*. [S.l.]: Neuromodulation: Technology at the Neural Interface, 2002. 25–31 p. Citado na página 15.
- IASP, I. A. f. t. S. o. P. P. CLASSIFICATION OF CHRONIC PAIN DESCRIPTIONS OF CHRONIC PAIN SYNDROMES AND DEFINITIONS OF PAIN TERMS. *IASP*, 1994. Citado na página 14.
- MELZACK, R.; WALL, P. D. *Pain mechanisms: a new theory*. [S.l.]: Psychosocial Processes and Health: A Reader, 1965. 971–979 p. Citado na página 15.
- OLIVEIRA, C. Estimulador Medular Permite Controle da Dor Crônica. *Mundo Sem Dor*, 2013. Citado na página 16.
- SABBATINI, R. A História da Estimulação Elétrica Cerebral. *Revista Cérebro & Mente*, 2004. Citado na página 15.
- SANCHIS, F. G. NEUROESTIMULADOR MEDULAR ALTERNATIVA PARA AS DORES CRÔNICAS. *Colunar*, 2014. Citado na página 14.
- SANTOS, L. G. B. G. Pedro M. dos. Desenvolvimento de um Protótipo de Neuroestimulador para Dor Crônica. *Trabalho de conclusão de curso*, 2015. Citado na página 40.
- SCHADE, C. M. et al. Assessment of patient preference for constant voltage and constant current spinal cord stimulation. *Neuromodulation*, v. 13, n. 3, p. 210–217, 2010. Citado na página 17.

SEARS, N. C. et al. Long-term outcomes of spinal cord stimulation with paddle leads in the treatment of complex regional pain syndrome and failed back surgery syndrome. *Neuromodulation: Technology at the Neural Interface*, onlinelibrary.wiley.com, 2011. Citado na página 16.

SMITH, B. H. et al. The impact of chronic pain in the community. *Medicine & Health from Oxford*, 2001. Citado na página 13.

WASHBURN, S. et al. Patient-perceived differences between constant current and constant voltage spinal cord stimulation systems. *Neuromodulation*, v. 17, n. 1, p. 28–35; discussion 35–6, 2014. Citado na página 17.