

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE FÍSICA
GRUPO DE ESPECTROSCOPIA DE MATERIAIS (GEM)

TCC

Título do trabalho: Circuito elétrico baseado no circuito da ponte wheatstone ativa para detecção de radiações ionizantes de baixas energias

Área de concentração: Física Médica
Discente: Daniela Santana de Souza
Orientador: Prof. Dr. Mauricio Foschini

Uberlândia
10/2020

RESUMO

Neste trabalho, foi realizado a construção de um circuito eletrônico, com a finalidade de haver um aumento na sensibilidade de leitura da resposta de corrente da câmara de ionização, para detecção de radiação ionizante de baixas energias. A sensibilidade obtida pelo circuito utilizou o princípio da Ponte de Wheatstone ativa, que consiste em um circuito da ponte de Wheatstone utilizando amplificadores operacionais. As mudanças efetivas deste trabalho foi na mudança do circuito, que aplica-se o mesmo conceitos da ponte, porém aplicada em malhas de capacitores comerciais, utilizando um dos capacitores como câmara de ionização, para a incidência da radiação. O circuito foi interpretado buscando a mudança da reatância capacitiva e resistiva da câmara, com isto, a resposta da alteração no balanço da tensão dos capacitores não será mais nula com a incidência de radiação ionizante no sensor. Por fim, obtive a resposta de impedância do circuito para ondas senoidais e quadrada, obtendo assim, uma resposta linear para energias entre 9 keV e 25 keV em ondas senoidais.

ABSTRACT

In this work, the construction of an electronic circuit was carried out, in order to increase the sensitivity of reading the current response of the ionization chamber, to detect low energy ionizing radiation. The sensitivity obtained by the circuit used the active Wheatstone bridge principle, which consists of a Wheatstone bridge circuit using operational amplifiers. The effective changes of this work were in the change of the circuit, which applies the same concepts of the bridge, however applied in meshes of commercial capacitors, using one of the capacitors as an ionization chamber, for the incidence of radiation. The circuit was interpreted seeking to change the capacitive and resistive reactance of the chamber, with this, the response of the change in the voltage balance of the capacitors will no longer be null with the incidence of ionizing radiation in the sensor. Finally, it obtained the impedance response of the circuit for sine and square waves, thus obtaining a linear response for energies between 9 keV and 25 keV in sine waves.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Circuitos Passivos que detectam tensão de saída. A) Ponte de Wheatstone convencional em equilíbrio, tensão final nula. B) Circuito aprimorado com resistores variáveis, portanto uma Ponte de Wheatstone desequilibrada (Braga, n.d.).....	9
Figura 2. Circuitos que detectam tensão de saída com amplificador operacional. A) Representando circuito simples composto pela Ponte de Wheatstone e um amplificador operacional. B) Circuito aprimorado com um amplificador operacional e dois resistores (Braga, n.d.).	10
Figura 3. Circuito composto pela Ponte de Wheatstone com dois amplificadores operacionais (Bastos, n.d.).....	10
Figura 4. Circuito com a melhor visualização da Ponte de Wheatstone com dois amplificadores operacionais, representando sensor montado no projeto.	11
Figura 5. Ponte de Wheatstone composta por capacitores e amplificadores operacionais, utilizando fonte de corrente alternada. Circuito proposto neste trabalho.	11
Figura 6. Circuito Ativo da ponte de Wheatstone montado no protoboard.	14
Figura 7. Montagem do circuito apresentado neste projeto na placa protoboard.	14
Figura 8. Montagem do circuito completo apresentado pelo projeto.	15
Figura 9. Sinais detectados a partir da ativação do circuito, com a variação de tensão na incidência do raios X de A) 5 kV, B) 10 kV, C) 15 kV, D) 20 kV e E) 25 kV.....	18
Figura 10. Gráfico representante da interação do raios X em um capacitor comercial, a partir da variação da área de sinal detectada, com a intensidade aplicada de radiação.....	20
Figura 11. Sinais detectados a partir da ativação do circuito, com a variação de tensão na incidência do raios X de A) 5 kV, B) 10 kV, C) 15 kV, D) 20 kV e E) 25 kV.	22
Figura 12. Gráfico representante da interação do raios X em um capacitor comercial, a partir da variação da área de sinal detectada, com a intensidade aplicada de radiação.....	23

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	OBJETIVOS	7
2	TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	9
2.1	PONTES DE WHEATSTONE	9
2.1.1	PONTE DE WHEATSTONE UTILIZADA NO PROJETO	10
2.2	CÁLCULO TEÓRICO DO GANHO NA PONTE DE WHEATSTONE	12
2.3	MONTAGEM PRÁTICA DA PONTE DE WHEATSTONE ATIVA	13
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
3.1	RESPOSTA APRESENTADA PELO CIRCUITO ATIVO COM RESISTORES	16
3.2	RESPOSTA APRESENTADA PELO CIRCUITO COM CAPACITORES	17
3.2.1	ONDA SENOIDAL	17
3.2.2	ONDA QUADRADA	21
4	CONCLUSÃO	24
5	REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

Em 1895, o físico Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923) descobriu que os tubos de raios catódicos produziam raios, que saiam do tubo e não era luz, nem os raios catódicos mas foram designado como o raios X (Peruzzo, Pottker, & Prado, 2014a). A descoberta dos raios X refletiu em um grande avanço na sociedade, sendo enfatizado na área médica, possibilitando diagnósticos e tratamentos. Com o aumento de estudos sobre os raios X, possibilitou determinar a sua eficácia em aplicações médicas, como também os seus riscos.

Os raios X são radiação ionizante que pode trazer danos as pessoas e ao meio ambiente com efeitos acumulativos, cuja interação com os tecidos de seres vivos ocasionam mutações no material genético, podendo até levar à morte (Peruzzo, Pottker, & Prado, 2014b). Conseqüentemente, ocorreu o aumento nos estudos de proteção radiológica e nas técnicas de quantificação da dose de radiação absorvida, que são de extrema importância na área, sendo estes designados como radioproteção e dosimetria (Carvalho Veludo, 2011). A dosimetria é uma área ampla que abrange toda a forma de se medir as doses de radiação, nela é medido dose absorvida pelos indivíduos ocupacionalmente exposto. Para o monitoramento de intensidade de radiações em ambientes e doses recebidas por esses indivíduos utilizados equipamentos como, para de uso pessoal é chamado de EPI's (Equipamento de Proteção Individual), para o uso dos indivíduos ocupacionalmente expostos em jornadas de trabalho são necessários os dosímetros, aos pacientes na maioria dos casos usam coletes de chumbo, já para as estruturas físicas como as salas que abriga os aparelhos que emitem radiação é necessário sensores para à verificação de radiação de fuga para onde será analisado em um levantamento radiométrico do local,

já que nesses lugares devem ser devidamente blindados (Tauahata, Luiz; Salati, Ivan; Prinzió & Zio, 2014).

Antes de efetuar a exposição de objetos ou pessoas em um feixe de radiação ionizante, deve-se calibrar os equipamentos para determinar a intensidade e qualidade do feixe gerado pela fonte, podendo, determinar a dose de exposição a este feixe. Portanto na calibração utiliza-se as câmaras de ionização para o controle de qualidade de fontes(Costa & Caldas, 2008).

As câmaras de ionização são formadas por dois eletrodos de material condutor dentro de uma câmara, preenchido por um meio gasoso (ar), onde a radiação ionizante ao atravessar a câmara, ela ioniza os átomos do ar, produzindo pares de cargas. Aplicado uma diferença de potencial (ddp) entre as placas, cria –se um campo elétrico que efetuará o transporte das cargas aos eletrodos, resultando em uma corrente elétrica, que é proporcional com a intensidade de radiação incidente e o volume de interação (Amazonas, I. B., 2005).

Portanto, estudar o princípio fundamental do funcionamento da câmara de ionização e a eletrônica utilizada para detecção de alterações físicas destas câmaras são de extrema importância para um físico médico, que serão empregados diretamente em seu cotidiano na área de dosimetria.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho teve como principal objetivo a construção de um circuito eletrônico que aumentasse a sensibilidade de leitura da alteração na câmara de ionização para detecção da presença de fugas de radiação ionizante. O ganho na sensibilidade será obtida utilizando o princípio do circuito elétrico da Ponte de

Wheatstone para comparar diferenças de potenciais em redes de capacitores, mas utilizando conceitos aplicados na mudança do capacitor utilizado como câmara com a incidência da radiação, interpretando a mudança da reatância capacitiva e resistiva da câmara, com isto, pode-se medir a alteração no balanço da tensão que já não será mais nula. Esta alteração de tensão pode ser relacionada com a radiação incidente no sensor. Para verificar sua eficácia, foi observado se houve uma resposta linear entre esses dois parâmetros.

2 TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Entre todas as técnicas e procedimentos experimentais usados neste projeto de construção do circuito que possa detectar radiação, destaca-se o circuito da Ponte de Wheatstone, que foi investigada e modificada para cumprir os objetivos deste trabalho.

2.1 PONTES DE WHEATSTONE

Há vários modelos de circuitos com princípios básicos da Ponte de Wheatstone com a finalidade sensorial, sendo diferenciados pelos componentes eletrônicos que em cada um utiliza para a melhoria do sistema, podendo diferenciar como ativos e passivos (Braga, n.d.).

Os circuitos passivos são característicos pela presença da Ponte de Wheatstone de forma direta sem a adição de amplificadores de tensão, para ter a medida de tensão final interagida pelo sistema, como mostra na Figura 1.

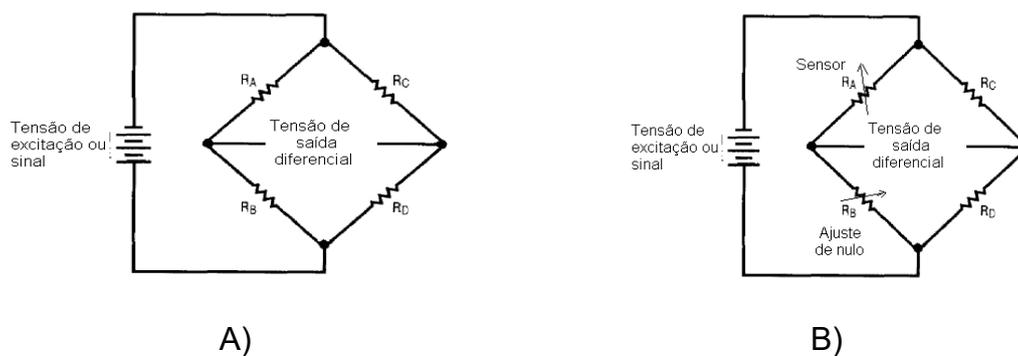


Figura 1. Circuitos Passivos que detectam tensão de saída. A) Ponte de Wheatstone convencional em equilíbrio, tensão final nula. B) Circuito aprimorado com resistores variáveis, portanto uma Ponte de Wheatstone desequilibrada (Braga, n.d.).

Os circuitos da Ponte de Wheatstone ativos tem em sua característica a presença de resistores, com a adição de amplificadores operacionais, para ter a medida resultante de valor mais significativo, como mostra na Figura 2.

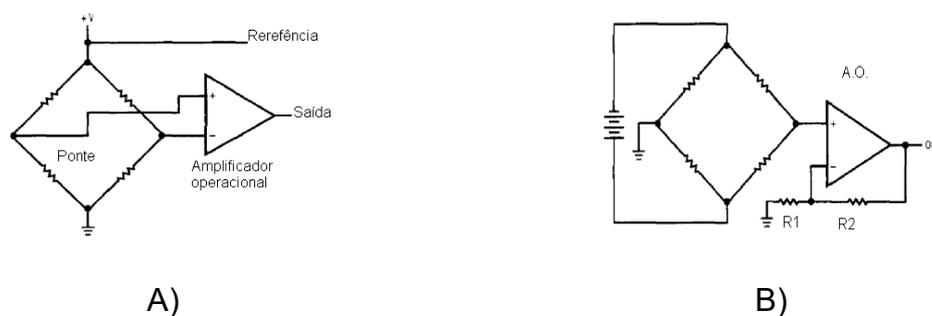


Figura 2. Circuitos que detectam tensão de saída com amplificador operacional. A) Representando circuito simples composto pela Ponte de Wheatstone e um amplificador operacional. B) Circuito aprimorado com um amplificador operacional e dois resistores (Braga, n.d.).

Com a utilização de amplificadores de potenciais, surge inúmeros tipos de circuitos com o princípio da Ponte de Wheatstone, mas existe um específico que terá maior reprodutibilidade para o sensor proposto neste trabalho.

2.1.1 PONTE DE WHEATSTONE UTILIZADA NO PROJETO

O circuito ativo da ponte de Wheatstone utilizado neste projeto pode ser observado na pela Figura 3.

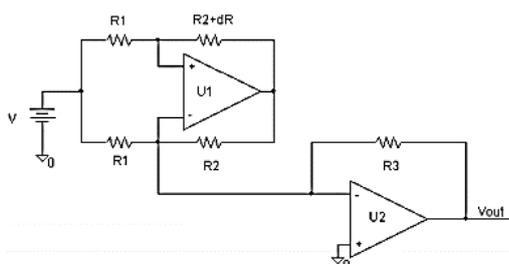


Figura 3. Circuito composto pela Ponte de Wheatstone com dois amplificadores operacionais (Bastos, n.d.).

Para facilitar a visualização da Ponte de Wheatstone, que está presente na Figura 3, foi somente redesenhado como mostra a Figura 4, sendo ele o primeiro circuito analisado neste trabalho.

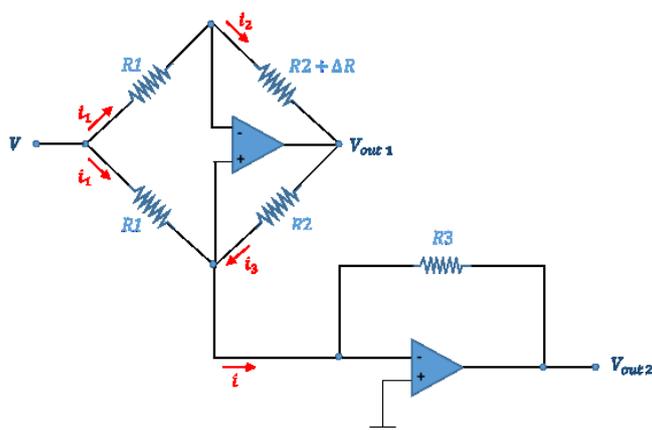


Figura 4. Circuito com a melhor visualização da Ponte de Wheatstone com dois amplificadores operacionais, representando sensor montado no projeto.

O segundo circuito deste trabalho foi baseado na ponte de Wheatstone, pois ele é composto por capacitores de poliéster na substituição da resistências, pois o capacitor irá agir como uma resistência de alta impedância, sendo ele uma boa opção para a melhoria do circuito.

Um dos capacitores do sistema foi exposto a radiação ionizante, que modifica as características do dielétrico, gerando respostas ao circuito. E foi necessária aplicação de uma fonte de corrente alternada, como é representado na Figura 5.

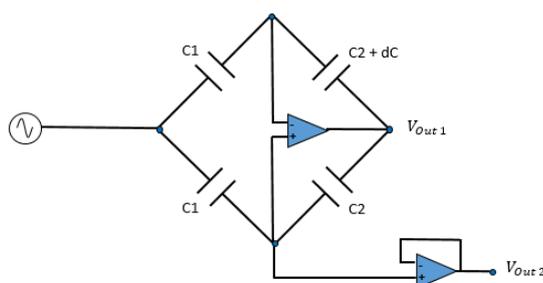


Figura 5. Ponte de Wheatstone composta por capacitores e amplificadores operacionais, utilizando fonte de corrente alternada. Circuito proposto neste trabalho.

2.2 CÁLCULO TEÓRICO DO GANHO NA PONTE DE WHEATSTONE

O potencial e o ganho obtido no circuito da Figura 3 e Figura 4 possibilita as medidas a partir dos cálculos desenvolvidos a seguir, sendo o resultado deste ganho foi dado por (Bastos, n.d.):

$$V_{out 2} = \frac{R3 \Delta R}{R1 R2} V \quad (1)$$

O qual, $V_{out 2}$ é a tensão de saída, em função V de entrada, as resistências da ponte e a variação da resistência ΔR .

A dedução da equação (1) foi feita através das Leis de Kirchhoff sobre o circuito da Figura 4, e foi calculado da seguinte forma:

Considerando $V_a = V_b$ temos que $i_1 = i_2 = \frac{V}{R_1}$,

$$V_{out 1} = -(R2 + \Delta R)i_2 \quad (2)$$

Substituindo i_2 :

$$V_{out 1} = -(R2 + \Delta R)\frac{V}{R_1} \quad (3)$$

Sendo $i = i_1 + i_3$

$$i = \frac{V}{R_1} - \left(\frac{R2+\Delta R}{R2}\right)\frac{V}{R_1} \quad (4)$$

Simplificando

$$i = 1 - \left(\frac{R2+\Delta R}{R2}\right)\frac{V}{R_1} \rightarrow i = \left(\frac{-\Delta R}{R2}\right)\frac{V}{R_1} \quad (5)$$

Sendo $V_{out 2} = -R3 \cdot i$

$$V_{out 2} = -R3 \left(\frac{-\Delta R}{R2} \right) \frac{V}{R1} \quad (6)$$

Simplificando:

$$V_{out 2} = \frac{R3 \Delta R}{R1 R2} V \quad (7)$$

Portanto a equação (7) é igual a (1), verificando sua origem e eficácia. E analisando esta equação resultante, demonstra que $V_{out 2}$ é linear com a variação da resistência ΔR .

Os cálculos para o circuito representado pela Figura 5, no qual é composto por capacitores, é dado pela reatância capacitiva:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (8)$$

Onde f é a frequência (Hz) e C é a capacitância do capacitor (F)

Sendo configurada em uma onda senoidal, cujo para frequência alta de $f = 159,7 \text{ KHz}$ e $C = 0,92 \text{ nF}$:

$$X_C = 1083,247 \Omega$$

Para uma onda quadrada, cujo para frequência baixa de $f = 2,769 \text{ KHz}$ e $C = 0,92 \text{ nF}$:

$$X_C = 62475,444 \Omega$$

2.3 MONTAGEM PRÁTICA DA PONTE DE WHEATSTONE ATIVA

Os circuitos foram montados a partir da placa protoboard para a realização das medidas da Ponte de Wheatstone.

O primeiro circuito com os resistores, a sua montagem está demonstrada na Figura 6 e o esquema na Figura 4.

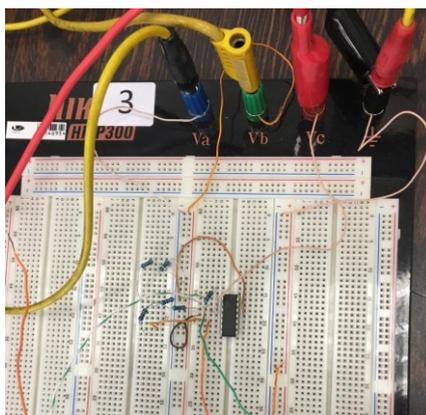


Figura 6. Circuito Ativo da ponte de Wheatstone montado no protoboard.

Neste circuito foi utilizado fonte simétrica com a tensão no valor de $\sim 15\text{ V}$, um amplificador operacional TL074CN que tem alto valor de impedância de entrada ($\sim 10^{12}\Omega$), três resistores de $10\text{ k}\Omega$ e um resistor de $6,8\text{ k}\Omega$ ligado a um potenciômetro para que o resultado obtido pelo multímetro fosse estável.

O segundo circuito com os capacitores representado na Figura 7 e o esquema na Figura 5, contém quatro capacitores de aproximadamente $0,92\text{ nF}$ e amplificador operacional TL074CN.

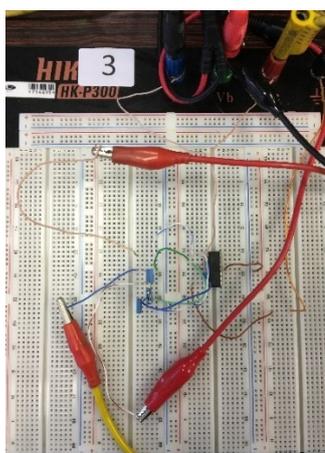


Figura 7. Montagem do circuito apresentado neste projeto na placa protoboard.

O circuito foi submetido a uma tensão de $\sim 15\text{ V}$, e ligado em série com o gerador de função, proporcionando uma corrente alternada, avaliados tanto em onda

senoidal ($f = 135,6 \text{ KHz}$), como em onda quadrada ($f = 1,05 \text{ KHz}$), foi adicionado na saída do circuito um osciloscópio para realizar a coleta de dados. O capacitor de trabalho (capacitor que será irradiado) foi inserido no equipamento de raios X, e foi exposto a radiação. O equipamento de raios X utilizado foi o modelo da Phywe 09056.98, sendo o tubo de raios X alimentado por uma tensão DC que pode ser ajustada nas faixas de 0 à 25kV, e o anodo do tudo é constituído de cobre. O esquema da montagem pode ser visualizado na Figura 8.

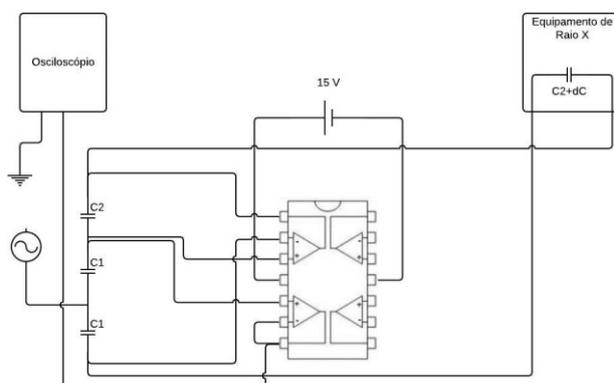
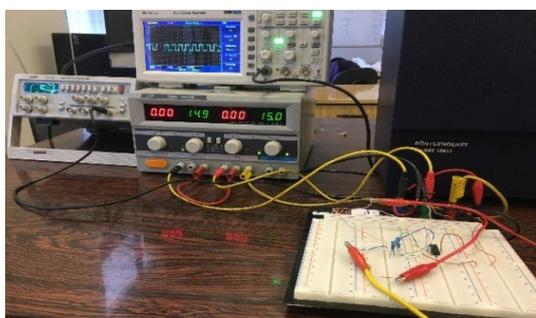


Figura 8. Montagem do circuito completo apresentado pelo projeto.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pode-se relacionar os capacitores com a câmara de ionização, já que ambos possuem placas paralelas, que entre elas há um material que irá ionizar com a incidência dos raios X, modificando assim a sua impedância. Para este caso, tem-se um material dielétrico polimérico entre as placas ao invés de ar. Assim é esperado a resposta desta interação, ao detectar a presença de radiação ionizante.

Foram utilizados capacitores de PET (polietilenotereftalato), com placas planas, paralelas e retangulares como sensores, da marca EPCOS, com incidência transversal e a blindagem removida (F. Silva et al., 2018).

Antes de realizar as medidas com os raios X, o circuito baseado na Ponte de Wheatstone foi o cálculo teórico para assegurar a eficácia, e a partir dos cálculos que apresentaram bons resultados, avançou para a montagem do circuito, verificando se as medidas do circuito equivaleria com os resultados teóricos.

3.1 RESPOSTA APRESENTADA PELO CIRCUITO ATIVO COM RESISTORES

O circuito foi submetido há várias medidas com resistores conhecidos de 10 k Ω e um resistor de 6,8 k Ω , como demonstrado anteriormente pela Figura 4 e Figura 6, e tendo elas resultados de alta sensibilidade. Essas medidas apresentaram variação com a presença de temperatura e até mesmo leves aquecimentos usando LEDs de alta intensidade, portanto circuito resultou em alta sensibilidade que poderá ter inúmeras aplicações na área de sensoriamento.

3.2 RESPOSTA APRESENTADA PELO CIRCUITO COM CAPACITORES

Apesar do ganho elevado do circuito apresentado com as resistências, observou-se que a impedância baixa do circuito montado com o segundo amplificador operacional interferia na medida, assim, passou a utilizar o segundo amplificador como seguidor de tensão. Neste esquema, pode isolar completamente o circuito e medir somente o potencial nos capacitores com impedância de $10^{12}\Omega$.

No circuito foi analisado de duas formas sendo elas na aplicação de onda senoidal e onda quadrada, mas apenas a onda senoidal apresentou resultados satisfatórios. Cada modo apresentou informações através das suas respectivas áreas, podendo observar a variação sobre a interação do capacitor exposto a radiação. Ambos os modos de ondas, foram realizadas as medidas com a variação de tensão do tubo de raios X, variando do limite de 0 kV à 25 kV.

3.2.1 ONDA SENOIDAL

A oscilação forçada do circuito foi realizada com a aplicação de uma tensão de 5 V de corrente alternada, utilizando um gerador de função no modo de uma onda senoidal, com frequência de 135,6 kHz, em série, aplicou-se 15V de corrente contínua em série no circuito.

O osciloscópio foi ajustado em medidas AC para descarte o sinal de entrada de 15 V DC inserida em série, potencial necessário para promover o transporte de carga no capacitor, restando somente a perturbação do sinal da onda senoidal. O sinal detectado pelo osciloscópio está representado na Figura 9A até Figura 9E, que ao comparar as 5 tensões do tubo de raios X, aplicadas no capacitor exposto, pode-se

verificar nas figuras um variação na forma da onda, ficando um conjunto de oscilações positivas e outro conjunto negativo, cuja áreas sendo proporcional ao aumento da tensão do tubo de raios X, ocorrendo uma maior transmissão de energia, havendo assim uma maior absorção pelo sistema do circuito.

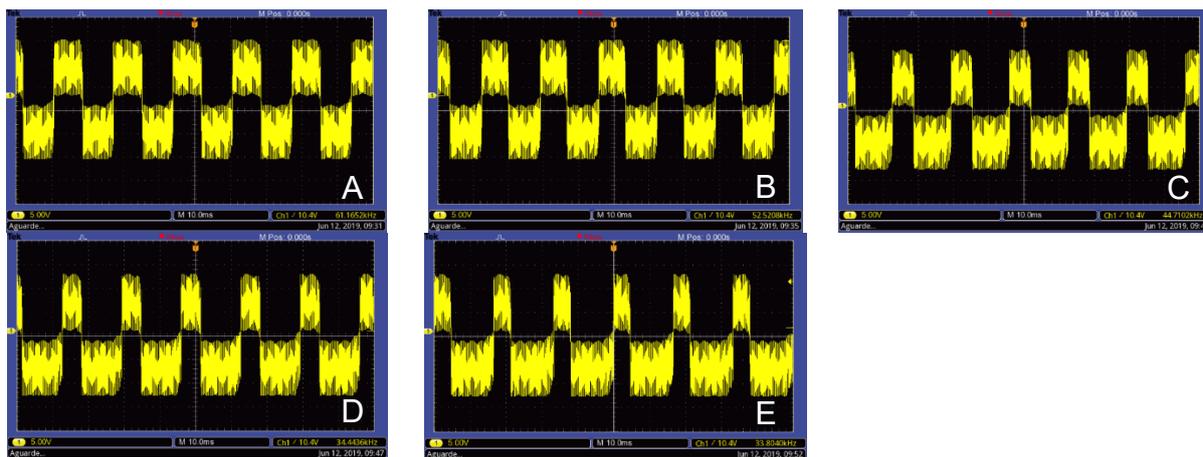


Figura 9. Sinais detectados a partir da ativação do circuito, com a variação de tensão na incidência do raios X de A) 5 kV, B) 10 kV, C) 15 kV, D) 20 kV e E) 25 kV.

Os dados foram caracterizados obtendo a cada sinal as áreas A1 e A2, respectivamente áreas superiores e inferiores do sinal positivo e negativo, e para cada tensão do tubo de raios X incidida no capacitor, tivemos no sinal 5 valores de A1 e 6 valores de A2, pelo qual obtivemos o valor médio dessas áreas $\overline{A1}$ e $\overline{A2}$, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Valores das variações nas áreas superiores e inferiores, do sinal positivo e negativo e suas medias em função da tensão aplicada pelo tubo de raios X.

	A _{1,1}	A _{1,2}	A _{1,3}	A _{1,4}	A _{1,5}	A _{1,6}	$\overline{A_1}$
5 kV	0,038	0,046	0,046	0,045	0,046	-	0,044
10 kV	0,043	0,043	0,042	0,043	0,043	-	0,043
15 kV	0,034	0,034	0,035	0,034	0,034	-	0,034
20 kV	0,030	0,031	0,031	0,031	0,030	-	0,031
25 kV	0,027	0,026	0,026	0,026	0,026	-	0,026
	A _{2,1}	A _{2,2}	A _{2,3}	A _{2,4}	A _{2,5}	A _{2,6}	$\overline{A_2}$
5 kV	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
10 kV	0,068	0,068	0,068	0,067	0,068	0,068	0,068
15 kV	0,079	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
20 kV	0,085	0,085	0,084	0,084	0,085	0,085	0,085
25 kV	0,089	0,090	0,089	0,090	0,090	0,089	0,090

A relação entre média das áreas $\overline{A_1}$ e $\overline{A_2}$, foi feita uma razão sobre as elas dada por:

$$\frac{\overline{A_2}}{\overline{A_1}} = \text{Intensidade absorvida no circuito} \quad (9)$$

No qual os resultados obtidos pela equação 9 para cada tensão, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores da razão das médias das áreas para cada tensão aplicada pelo tubo de raios X.

	$\overline{A_2}/\overline{A_1}$
5 kV	1,48
10 kV	1,59
15 kV	2,34
20 kV	2,76
25 kV	3,42

A tabela 2, resultou no seguinte gráfico, representado na Figura 10.

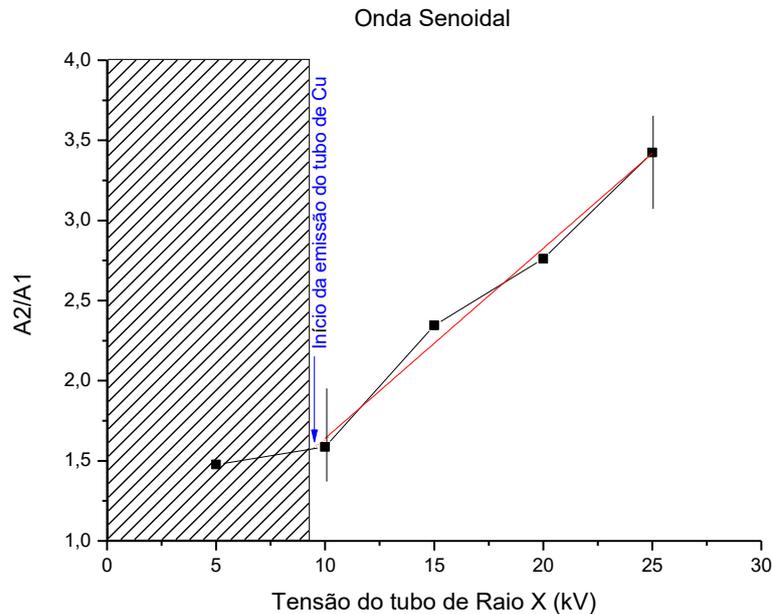


Figura 10. Gráfico representante da interação do raios X em um capacitor comercial, a partir da variação da área de sinal detectada, com a intensidade aplicada de radiação.

Observa-se no gráfico apresentado na Figura 10, que o sistema teve resultado linear. Entre as medidas em que os valores de tensão do tubo de Cu são de 5 kV a 10 kV observa-se que há uma variação mínima que representa a ausência de emissão no tubo de Cu e um ajuste fino offset na frequência para que inicialmente a onda esteja mais simétrica possível ($A1 \approx A2$). Sabemos que o tubo de Cu só inicia sua emissão a partir de um limiar de 9 kV (Amazonas, 2005) , no qual teve um resultado foi satisfatório, portanto o primeiro ponto caracterizado pela tensão de 5 kV não está no início da regressão linear, pois a regressão foi feita a partir do valor de 10 kV onde há certeza da presença da emissão do tubo de Cu. Portanto, a regressão linear, $y = a + b * x$, com os parâmetros, temos que os coeficientes linear e angular assume-se os valores de $a = 0,5 \pm 0,2$ e $b = 0,12 \pm 0,01$, com o valor importante para os resultados sendo a taxa de variação do sensor em função da tensão do tubo, portanto,

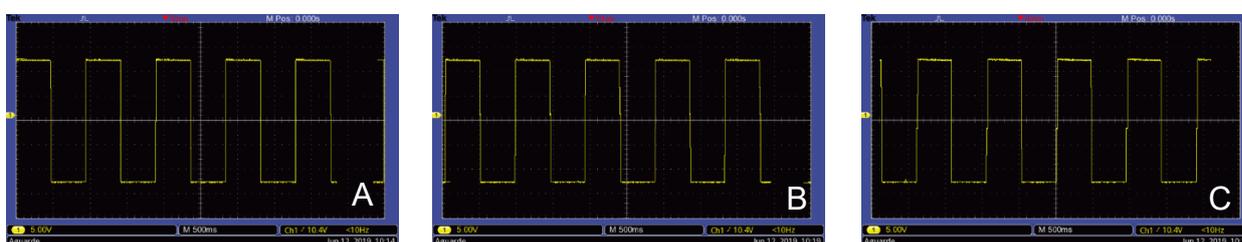
$A_2/(A_1 \cdot \text{Tens. Tubo}) = 0,12 \pm 0,01 \text{ (kV}^{-1}\text{)}$, lembrando que a razão das áreas será adimensional.

Portanto essas áreas representam a intensidade absorvida pelo circuito, que demonstra ao fim a interação do capacitor e a radiação incidente, que pode diretamente ser relacionada com a variação da carga do capacitor em função da radiação incidente, lembrando que a carga é igual ao produto da capacitância com a diferença de potencial no capacitor.

3.2.2 ONDA QUADRADA

A oscilação forçada do circuito foi realizada com a aplicação de uma tensão de 5 V de corrente alternada, utilizando um gerador de função no modo de uma onda quadrada, com frequência de 1,05 Hz, em série, aplicou-se 15V de corrente contínua em série no circuito.

O osciloscópio foi novamente ajustado em medidas AC para descartar o sinal de entrada de 15V DC inserida em série, restando somente a perturbação do sinal da onda quadrada. O sinal detectado pelo osciloscópio está representado na Figura 11A até Figura 11E, que ao comparar as 5 tensões do tubo de raios X, aplicadas no capacitor exposto, pode-se verificar nas figuras uma variação na forma da onda quadrada, ficando um conjunto de ondas positivas e outro conjunto negativo, cuja áreas sendo proporcional ao aumento da tensão do tubo de raios X, como já analisado pelo modo onda senoidal.



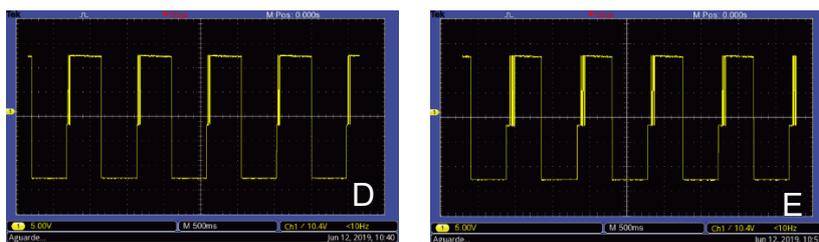


Figura 11. Sinais detectados a partir da ativação do circuito, com a variação de tensão na incidência do raios X de A) 5 kV, B) 10 kV, C) 15 kV, D) 20 kV e E) 25 kV.

Os dados foram caracterizados da mesma maneira que no modo senoidal, que para o sinal de 5 e 10 kV, obteve 5 valores de A1 e no sinal de 15 a 25 kV, 4 valores de A1. Em 5 a 15 kV, 4 valores de A2 e os de 20 e 25 kV, 5 valores de A2, pelo qual foi obtido o valor médio dessas áreas $\overline{A1}$ e $\overline{A2}$, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Valores das variações nas áreas superiores e inferiores, do sinal positivo e negativo e suas medias em função da tensão aplicada pelo tubo de raios X.

	A _{1,1}	A _{1,2}	A _{1,3}	A _{1,4}	A _{1,5}	A _{1,6}	$\overline{A_1}$
5 kV	4,843	5,319	5,308	5,305	5,298	-	5,215
10 kV	4,843	5,319	5,331	5,327	5,297	-	5,223
15 kV	5,139	5,162	5,159	5,142	-	-	5,150
20 kV	4,811	4,784	4,781	4,810	-	-	4,722
25 kV	4,108	4,087	4,269	4,269	-	-	4,183
	A _{2,1}	A _{2,2}	A _{2,3}	A _{2,4}	A _{2,5}	A _{2,6}	$\overline{A_2}$
5 kV	6,432	6,431	6,407	6,433	-	-	6,425
10 kV	6,432	6,458	6,434	6,433	-	-	6,439
15 kV	6,455	6,428	6,455	6,455	-	-	6,449
20 kV	6,457	6,451	6,484	6,458	6,455	-	6,461
25 kV	6,424	6,478	6,455	6,486	6,453	-	6,4593

Utilizando novamente a equação 9, para haver a relação entre as áreas, no qual seus valores estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores da razão das médias das áreas para cada tensão aplicada pelo tubo de raios X.

	\bar{A}_2/\bar{A}_1
5 kV	1,23
10 kV	1,23
15 kV	1,25
20 kV	1,37
25 kV	1,54

A partir dos valores obtidos na Tabela 4, resultou no seguinte gráfico, representado na Figura 12.

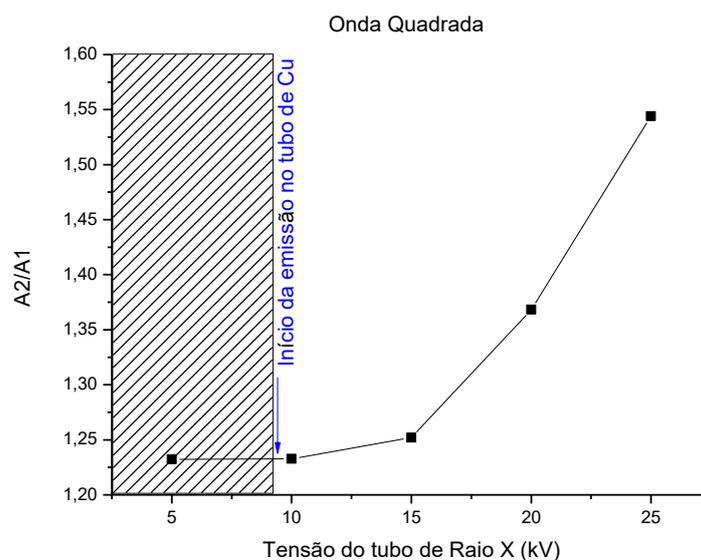


Figura 12. Gráfico representante da interação do raios X em um capacitor comercial, a partir da variação da área de sinal detectada, com a intensidade aplicada de radiação.

O gráfico demonstra que pela onda quadrada não satisfaz a linearidade, portanto já era esperado este resultado não satisfatório pois com a excitação por onda quadrada, ao elevar ou cair bruscamente o potencial no capacitor, faz com que o capacitor com a própria indutância do circuito, crie pequenas flutuações, que podem interferir em seu valor final, ficando igual a um circuito LC com a onda quadrada. E a

reatância é apenas calculada para a onda senoidal, e para a onda quadrada já não é possível fazer este tipo de análise da forma empregada neste trabalho.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho obtiveram uma concordância com o esperado. Pela análise dos modos de oscilação forçada aplicadas ao circuito, o capacitor exposto respondeu à interação da radiação incidente, a partir disto satisfaz o objetivo do circuito que é a detecção sobre essa interação. Como foi proposto dois modos de oscilação forçada para análise do circuito, obtive resultados em ambos modos, porém a onda senoidal teve os resultados lineares, de forma mais suscetível a compreensão de dados e aplicabilidade, pois por ter seu comportamento linear, a avaliação sobre ela e seus parâmetros, pode apresentar dados de fácil leitura. Para a onda quadrada, o circuito também apresentou uma resposta à interação da radiação ionizante incidente ao capacitor, mas ela não teve resposta linear, portanto mais difícil de ser compreendida e analisada. Assim, pode-se concluir que este circuito com a perturbação de onda senoidal, ajustado no equilíbrio da reatância capacitiva do circuito, pode ser empregado para análise de intensidade de raios X entre 0 e 25 kV, poderia ser empregada fontes calibradas para que tenha a correspondência dessas intensidades em função da resposta do sensor, porém, o tubo utilizado não possui esses parâmetros para tal cálculos.

Lembrando que o circuito proposto foi montado em uma placa de protoboard, e este circuito não possui nenhum tipo de blindagem, com isto está suscetível a ruídos que influenciam nos dados colhidos para análises, portanto os resultados deste

trabalho podem ser melhorados realizando as blindagens contra cargas eletrostáticas em todo o sistema.

Este trabalho cumpriu integralmente o proposto no projeto que foi de criar um novo circuito eletrônico com que aumentasse a sensibilidade de leitura da alteração na câmara de ionização para um capacitor comercial, na detecção da presença de fugas de radiação ionizante. Podendo também ser utilizado para outros fins de detecção, não apenas para raios X.

O primeiro circuito montado, baseado na ponte de Wheatstone proposto inicialmente, teve um grande aumento na sensibilidade de leitura, pois buscávamos leituras de grandezas com valores muito pequenos, e o resultados apresentado pelo circuito foi muito maior que o esperado. Porém, devido à baixa impedância do circuito, foi necessário a alteração do circuito proposto inicialmente. Portanto, devido à alta sensibilidade e qualidade deste circuito, facilmente ele poderá ser empregado em outros sensores aplicados na área de Física Médica.

5 REFERÊNCIAS

Peruzzo, J., Pottker, W. E., & Prado, T. G. do. (2014). *Física moderna e contemporânea: das teorias quânticas e relativísticas às fronteiras da física: volume 1* (2ª Edição). São Paulo: Editora Livraria da Física.

Peruzzo, J., Pottker, W. E., & Prado, T. G. do. (2014). *Física Moderna e Contemporânea: das teorias quânticas e relativísticas às fronteiras da física: volume 2* (1ª Edição). São Paulo: Editora Livraria da Física.

Carvalho Veludo, P. (2011). *Efeitos da Radiação X e Níveis de Exposição em Exames Imagiológicos Inquéritos a Clínicos Gerais*. Retrieved from [https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/20124/1/Efeitos da Radiação-X e Níveis de Exposição em Exames Imagiológicos.pdf](https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/20124/1/Efeitos%20da%20Radiação-X%20e%20Níveis%20de%20Exposição%20em%20Exames%20Imagiológicos.pdf)

Tauahata, Luiz; Salati, Ivan; Prinzio, R. D. P., & Zio, A. R. D. (2014). *Radioproteção E Dosimetria : Fundamentos. Ird/Cnen*. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.7476/9788523209247>

Costa, A. M. da, & Caldas, L. V. E. (2008). *Câmara de ionização de placas paralelas para radiação-X de radiografia convencional e mamografia*. *Radiologia Brasileira*, 41(1), 39–43. <http://doi.org/10.1590/S0100-39842008000100011>

Amazonas, I. B. (2005). *Desenvolvimento e caracterização de uma câmara de ionização totalmente polimérica para dosimetria de raios-x [dissertação]*. Recife: Universidade Federal de Pernambuco; 2005.

Braga, N. C. (n.d.). Pontes para Sensores (INS167). Retrieved March 12, 2019, from <http://newtoncbraga.com.br/index.php/instrumentacao/108-artigos-diversos/4204-ins167>

Bastos, J. (n.d.). Condicionamento em ponte de wheatstone de um termistor. Retrieved March 12, 2019, from http://intranet.deei.fct.ualg.pt/archive/Inst_2000/lab03.pdf

F. Silva, A., Nishida, K., José do Carmo, É., Pereira Neves, L., Paula Perini, A., & Foschini, M. (2018). Estudo De Capacitores Comerciais Para Aplicação Em Dosimetria Das Radiações Ionizantes, 509–511. <http://doi.org/10.29327/cobecseb.78813>