

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LEONARDO TERRA SILVA  
MILENA CARIUS DA SILVA NEVES**

**ESTUDO COMPARATIVO DE DIVISORES PARA ALTA TENSÃO EM  
CORRENTE CONTÍNUA**

**VOLTA REDONDA  
2020**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ESTUDO COMPARATIVO DE DIVISORES PARA ALTA TENSÃO EM  
CORRENTE CONTÍNUA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Alunos:  
Leonardo Terra Silva  
Milena Carius da Silva Neves

Orientador:  
Prof. D. Sc. Hélio de Paiva Amorim Junior

**VOLTA REDONDA  
2020**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Leonardo Terra Silva

Milena Carius da Silva Neves

Título da monografia:

ESTUDO COMPARATIVO DE DIVISORES PARA ALTA TENSÃO EM CORRENTE  
CONTÍNUA

Orientador:

Prof. D. Sc. Hélio de Paiva Amorim Junior

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. D. Sc. Hélio de Paiva Amorim Junior

---

Prof. M.Sc. Edson de Paula Carvalho

---

Prof. Esp. Maurício Ferreira Haddad

*A Deus por nos amparar e nos reerguer diante de todas as dificuldades encontradas. Aos nossos pais por terem nos proporcionado todos os meios para chegar até aqui. A todos os familiares, amigos e professores por todo apoio e incentivo.*

## AGRADECIMENTOS

*Agradecemos primeiramente a Deus por nos proporcionar saúde e força para lutar pelos nossos sonhos e objetivos, por nos ensinar a enfrentar todas as dificuldades e nunca pensar em desistir.*

*Aos nossos pais Alessandra Carius e Anderson Romão, Joel Pereira e Lídia Terra por não medirem esforços para realização desse sonho, por sempre nos apoiarem e acreditarem em nosso potencial. Aos demais familiares e amigos que incentivaram e nos fortaleceram durante a jornada.*

*Ao orientador Prof. D. Sc Hélio de Paiva Amorim Junior por proporcionar o estágio no CEPEL e por todo seu apoio na elaboração do trabalho.*

*Ao CEPEL por ensinar valores e nos fazer adquirir conhecimentos fundamentais para nossa carreira e por conceder todo o suporte necessário para realização desse trabalho.*

*A todos os integrantes do CEPEL que nos ajudaram a chegar até aqui, em especial Luiz Carlos de Azevedo, Marcus Vinícius Barros, Lilian Ferreira Santos, Carlos Magno Rodrigues Vasques, Francisco Eduardo Rodrigues de Araújo, Leonardo Torres Bispo dos Santos, Leonardo Barros da Silva, Neiton Prata dos Santos, Marcus Vinicius de Souza.*

*A instituição de ensino UniFOA e a todos os professores que com muito carinho e dedicação passaram os conhecimentos necessários para chegarmos até aqui.*

## RESUMO

Os ensaios elétricos de alta tensão têm como finalidade testar equipamentos, para que possam garantir seu funcionamento conforme as normas vigentes. Porém não se consegue medir alta tensão diretamente, fazendo-se necessário um dispositivo de conversão. Os divisores de tensão são dispositivos de conversão que tem como finalidade reduzir os valores a ponto de serem medidos em equipamentos de baixa tensão. Este trabalho reúne informações sobre a medição de alta tensão em corrente contínua (ATCC) e faz uma análise do comportamento de divisores de tensão em relação a ondulação residual. Com o objetivo de encontrar o sistema de medição mais adequado às medições, apresentando o menor fator de *ripple* possível e que esteja em conformidade com as exigências normativas vigentes. Para tal, foram estabelecidas distintas configurações de circuito e fonte utilizando-se de duas fontes de tensão, CC e CA com um arranjo retificador, distintos divisores, resistivos puro e universal, e a inserção de um capacitor em paralelo ao circuito de medição em algumas medições. A partir de avaliações pertinentes às distintas configurações é possível estabelecer a aplicabilidade de cada caso, a importância dos equipamentos utilizados e suas influências no circuito no resultado de cada ensaio. Os ensaios foram realizados no laboratório do CEPEL em ambiente controlado utilizando-se de um osciloscópio, como instrumento de medição, que permite a avaliação de formas de onda possibilitando esse estudo comparativo. Com essa análise será possível minimizar a presença elevada da ondulação residual, resultando em uma maior precisão em medições futuras.

Palavras-chave: ATCC; Divisor de Tensão; Capacitor; Ensaio elétrico; Ondulação Residual.

## ABSTRACT

*The high voltage electrical tests are intended to test equipment, so that they can guarantee its operation in accordance with current regulations. However, it is not possible to measure high voltage directly, making a conversion device necessary, voltage dividers are conversion devices whose purpose is to reduce the values to the point of being measured in low voltage equipment. This work gathers information about the measurement of high voltage in direct current (HVDC) and makes an analysis of the behavior of voltage dividers in relation to residual ripple. In order to find the most suitable measurement system for measurements, presenting the smallest possible ripple factor and in compliance with current regulatory requirements. To this end, different circuit and source configurations were established using two voltage sources, DC and AC with a rectifier arrangement, different dividers, pure and universal resistors, and the insertion of a capacitor parallel to the measurement circuit in some measurements. Based on evaluations relevant to the different configurations, it is possible to establish the applicability of each case, the importance of the equipment used and their influence on the circuit in the result of each test. The tests were carried out in the CEPEL laboratory in a controlled environment using an oscilloscope, as a measuring instrument, which allows the evaluation of waveforms enabling this comparative study. With this analysis it will be possible to minimize the high presence of residual ripple, resulting in greater accuracy in future measurements.*

*Keywords: HVDC; Voltage Divider; Capacitor; Electrical tests; Ripple.*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1. Justificativa.....	14
1.2. Objetivos.....	14
1.3. Contribuições.....	15
1.4. Descrição do Trabalho.....	15
<b>2. DIVISOR DE TENSÃO</b> .....	16
2.1. Divisor de Tensão Resistivo.....	18
2.2. Divisor de Tensão Capacitivo.....	21
2.3. Divisor de Tensão Misto.....	23
2.4. Divisor de Tensão Universal.....	24
<b>3. ENSAIOS ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO</b> .....	26
3.1. Impulso Atmosférico.....	26
3.1.1. Impulso Atmosférico Pleno.....	27
3.1.2. Impulso Atmosférico Cortado na Frente (IACf).....	29
3.1.3. Impulso Atmosférico Cortado na Cauda (IACc).....	30
3.2. Impulso de Manobra.....	31
3.3. Alta Tensão em Corrente Alternada (ATCA).....	32
3.4. Alta Tensão em Corrente Contínua (ATCC).....	34
<b>4. MEDIÇÃO DE TENSÃO CONTÍNUA</b> .....	36
4.1. Sistema de Medição.....	37
4.1.1. Sistema de Medição de Referência (SMR).....	38
4.1.2. Sistema de Medição Aprovado (SMA).....	38
4.2. Dispositivo de Conversão.....	40
4.3. Sistema de Transmissão.....	40
4.4. Instrumento de Medição.....	41
4.5. Ensaio em um Sistema de Medição Aprovado.....	41

4.6. Classificação de um Sistema de Medição .....	43
<b>5. ONDULAÇÃO RESIDUAL .....</b>	<b>45</b>
5.1. Fonte de Tensão em Corrente Contínua .....	46
5.2. Fonte de Tensão em Corrente Alternada .....	47
5.3. Retificação.....	48
5.3.1. Retificador de Meia Onda.....	49
5.3.2. Retificador de Onda Completa em Ponte .....	51
5.3.3. Retificadores em Cascata (COCKROFT-WALTON).....	52
5.4. Filtragem .....	54
<b>6. ESTUDO COMPARATIVO .....</b>	<b>57</b>
6.1. Instrumentos Utilizados .....	57
6.2. Arranjos.....	60
6.2.1. Fonte CC .....	60
6.2.2. Fonte AC com Retificador de Meia Onda .....	61
6.3. Memória de Cálculo.....	62
6.4. Resultados Obtidos .....	64
6.5. Resultados Comparativos .....	65
6.5.1. Análise com a Fonte CC.....	65
6.5.2. Análise com a Fonte CA.....	66
6.6. Análise Gráfica .....	67
<b>7. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>71</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Circuito simples de um divisor de tensão. ....	17
Figura 2: Amostra de um divisor resistivo para ATCA.....	18
Figura 3: Circuito equivalente de um divisor de tensão resistivo.....	19
Figura 4: Circuito básico de um divisor de tensão resistivo.....	20
Figura 5: Circuito de um Divisor de Tensão Capacitivo .....	21
Figura 6: Circuito simples de um Divisor de Tensão Misto.....	23
Figura 7: Circuito simples de um Divisor de Tensão Universal.....	24
Figura 8: Sobretensão externa (Descarga elétrica atmosférica). ....	27
Figura 9: Parâmetros de tempo do Impulso Atmosférico Pleno.....	28
Figura 10: Forma de onda para impulso atmosférico cortado na frente.....	29
Figura 11: Forma de onda para impulso atmosférico cortado na cauda. ....	30
Figura 12: Curva de um Impulso de Manobra. ....	31
Figura 13: Parâmetros do sinal de tensão para ensaios ATCA.....	33
Figura 14: Parâmetros do sinal de tensão para ensaios ATCC.....	35
Figura 15: Transmissão em ATCC e ATCA. ....	36
Figura 16: Componentes de um sistema de medição utilizado em alta tensão. ....	37
Figura 17: Esquema de construção do divisor resistivo e universal. ....	40
Figura 18: Cabo coaxial componente do Sistema de Transmissão. ....	41
Figura 19: Ondulação (ripple) pós retificação. ....	45
Figura 20: Fonte de Tensão Hipotronics série 8000 com 60 kV/módulo.....	46
Figura 21: Fonte regulável com tensão máxima de 200 kV. ....	47
Figura 22: Processo de conversão CA-CC de uma fonte de tensão. ....	48
Figura 23: Retificador em meia onda do CA2.....	49
Figura 24: Circuito completo (com as perdas) do retificador em meia onda. ....	50
Figura 25: Circuito simplificado do retificador de meia onda.....	51
Figura 26: Circuito simplificado do retificador de onda completa em ponte.....	51
Figura 27: Sinal de saída pós filtro capacitivo. ....	52
Figura 28: Retificador de tensão nominal de 1MV do tipo Cockcroft – Walton. ....	53
Figura 29: Cockcroft-Walton. ....	53
Figura 30: Filtragem com carga de baixo consumo. ....	55
Figura 31: Filtragem com carga de alto consumo. ....	55
Figura 32: Outros modelos de filtros. ....	56
Figura 33: Osciloscópio Digital. ....	57

Figura 34: Divisor Resistivo SMR7.....	58
Figura 35: Divisor Resistivo de 50 kV. ....	58
Figura 36: Divisor Universal SMR2.....	59
Figura 37: Capacitor de 1,2 $\mu$ F.....	59
Figura 38: Capacitor de 15 nF.....	60
Figura 39: Forma de onda do arranjo A.....	68
Figura 40: Forma de onda do arranjo B.....	68
Figura 41: Forma de onda do arranjo H.....	69
Figura 42: Forma de onda do arranjo I. ....	70
Figura 43: Arranjo A.....	75
Figura 44: Arranjo B.....	76
Figura 45: Arranjo C.....	76
Figura 46: Arranjo D.....	77
Figura 47: Arranjo E.....	77
Figura 48: Arranjo F.....	78
Figura 49: Arranjo G.....	78
Figura 50: Arranjo H.....	79
Figura 51: Arranjo I.....	79
Figura 52: Arranjo J.....	80
Figura 53: Arranjo K.....	80
Figura 54: Arranjo L.....	81
Figura 55: Arranjo M.....	81
Figura 56: Forma de onda do arranjo D.....	82
Figura 57 Forma de onda do arranjo E.....	83
Figura 58: Forma de onda do arranjo F.....	83
Figura 59: Forma de onda do arranjo J.....	84
Figura 60: Forma de onda do arranjo K.....	84
Figura 61: Forma de onda do arranjo L.....	85
Figura 62: Forma de onda do arranjo M.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tolerâncias aceitáveis em relação aos parâmetros.....	32
Tabela 2: Ensaio requeridos para um sistema de medição de tensão CC aprovado	42
Tabela 3: Resumo dos resultados obtidos com a fonte CC.....	64
Tabela 4: Resumo dos resultados obtidos com a fonte CA.....	65

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ATCA – Alta Tensão Corrente Alternada  
ATCC – Alta Tensão Corrente Contínua  
CC – Corrente Contínua  
CA – Corrente Alternada  
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica  
CA2 – Laboratório de Referência em Medição de Alta Tensão  
RMS – *Root Mean Square* (Valor Eficaz)  
FE - Fator de Escala  
IEC - *International Electrotechnical Commission*  
SMA - Sistema de Medição Aprovado  
SMR - Sistema de Medição de Referência  
V – Volts  
 $\Omega$  - Ohms  
MV – Megavolt  
M $\Omega$  – Mega Ohms  
k $\Omega$  – Kilo Ohms  
F – Faraday  
 $T_{mín}$  – Tempo Mínimo  
 $T_{máx}$  – Tempo Máximo  
IAP – Impulso Atmosférico Pleno  
IACc – Impulso Atmosférico Cortado na frente  
IACf – Impulso Atmosférico Cortado na cauda  
 $\mu$ s – Microsegundo  
pu – Sistema por Unidade  
IM – Impulso de Manobra

## LISTA DE APÊNDICES

<b>APÊNDICE 1</b> .....	75
<b>APÊNDICE 2</b> .....	82

## 1. INTRODUÇÃO

Em laboratórios não se consegue medir alta tensão diretamente, por isso, faz-se necessário um dispositivo de conversão para diminuir a amplitude de tensão a valores compatíveis aos instrumentos de medição, como por exemplo, os osciloscópios, multímetros etc.

Os divisores de tensão são dispositivos de conversão que tem como finalidade reduzir os valores possíveis de serem medidos em equipamentos de baixa tensão. São altamente utilizados, principalmente devido à facilidade de manipulação, estabilidade e fácil manutenção.

É considerada alta tensão em corrente contínua a tensão superior a 1500 Volts, essa tensão é obtida através das fontes de alimentação, que passam por um processo de retificação, em que a tensão senoidal é transformada em tensão contínua. Mesmo passando por esse processo ainda é encontrado indesejáveis ondulações residuais, conhecidas como "*ripple*", uma componente da corrente alternada.

Essa ondulação compromete a qualidade da alta tensão em corrente contínua, resultando em medições imprecisas, sendo necessário o controle para que a ondulação fique dentro das exigências estabelecidas pela norma NBR IEC60060-1.

Este estudo tem como princípio encontrar o sistema de medição mais adequado às medições em ATCC, apresentando o menor fator de *ripple* possível e que esteja em conformidade com as exigências normativas vigentes, a partir do comportamento das distintas configurações de circuito em relação a ondulação residual, utilizando-se de duas fontes de tensão, CC e CA com um arranjo retificador, diferentes divisores de tensão, puramente resistivos e universal, existentes no laboratório de referência em medição de alta tensão do Cepel (CA2).

Serão realizados ensaios em cada circuito, buscando analisar e comparar suas formas de onda e o fator de *ripple*, através do instrumento de medição osciloscópio. Com essa análise será possível minimizar a presença elevada da ondulação residual, resultando em uma maior precisão em medições futuras.

### 1.1. Justificativa

Mesmo após a retificação é possível encontrar uma ondulação residual na alta tensão em corrente contínua, essa ondulação compromete a qualidade da transmissão, pois não entrega uma tensão contínua pura, interferindo na precisão das medições do laboratório de referência em medições de alta tensão (CA2) do Cepel.

Devido a isso, foi necessário um estudo, com o intuito de verificar qual o melhor sistema de medição, tendo em vista qual minimiza ou agrava a ondulação citada. Com base em uma análise comparativa, será possível definir qual o divisor de tensão melhor se aplica na utilização em alta tensão em corrente contínua. A análise citada, é fundamentada pela forma de onda de cada divisor de tensão, visando sempre cumprir as exigências estabelecidas pela norma NBR IEC60060-1.

### 1.2. Objetivos

Este estudo tem por objetivo fazer uma análise técnica e comparativa entre os diferentes tipos construtivos de divisores de tensão, os quais são, divisor resistivo puro, divisor resistivo puro com capacitor em paralelo e divisor universal.

Buscando comparar e verificar qual tipo construtivo mais adequado para ser utilizado em alta tensão em corrente contínua, visando sempre em encontrar um nível de *ripple* que atenda as exigências normativas vigentes, além de demonstrar o comportamento da forma de onda de cada um deles através do osciloscópio.

### 1.3. Contribuições

Através desse estudo haverá uma contribuição significativa para a compreensão do comportamento de cada tipo construtivo de divisor em alta tensão em corrente contínua, sendo assim ele poderá ser utilizado com intuito de minimizar a presença elevada de ondulação residual em futuras medições, uma vez que sua aplicação possibilitará o uso do equipamento mais adequado, ou seja, o que melhor se comporta para tal medição.

A fim de evidenciar a importância de diminuir a ondulação residual e controlá-la para que fique dentro das tolerâncias normativas, será criado um software de monitoramento de medição da ondulação residual. Esse software possibilitará o operador a identificar se o nível do fator de ondulação está dentro dos limites pré-estabelecidos pela norma NBR IEC60060-1.

### 1.4. Descrição do Trabalho

Este trabalho descreverá o comportamento de alguns divisores para alta tensão em corrente contínua e irá comparar suas formas de onda através de um osciloscópio.

No capítulo 2 serão abordados todos os tipos construtivos de divisores de tensão e suas aplicabilidades.

No capítulo 3 serão exibidos alguns tipos de ensaios em alta tensão.

No capítulo 4 serão abordados os requisitos para Medição de tensão contínua e Sistemas de Medição, como eles são compostos e suas classificações.

No capítulo 5 será apresentado o processo de retificação e filtragem, assim como o conceito de ondulação residual.

No capítulo 6 serão exibidos os instrumentos utilizados e os resultados obtidos, bem como suas análises e comparações.

No capítulo 7 serão apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. DIVISOR DE TENSÃO

Em laboratórios não se consegue medir alta tensão diretamente, faz-se necessário um dispositivo de conversão para diminuir a amplitude de tensão a valores compatíveis aos instrumentos de medição, como por exemplo, os osciloscópios, multímetros etc.

Os divisores de tensão são dispositivos de conversão que tem como finalidade reduzir os valores possíveis de serem medidos em equipamentos de baixa tensão. São altamente utilizados, principalmente devido à facilidade de manipulação, estabilidade e fácil manutenção.

É um circuito composto por uma unidade de alta tensão (Z1) e uma unidade de baixa tensão (Z2), que tem como finalidade obter uma fração da tensão de entrada (V1) nos seus terminais. Sendo essa tensão aos terminais (V2) diretamente proporcional as suas impedâncias, que podem ser constituídas por resistores, capacitores ou a associação destes.

Os elementos dos divisores de tensão mencionados são geralmente instalados dentro de tubos isolantes de forma cilíndrica e dependendo do divisor é necessário adicionar óleo isolante. A altura do divisor depende da tensão máxima nominal aplicada, influenciando no design do eletrodo superior.

Para tensões na região de mega-volt (MV), faz-se necessário que a altura dos divisores esteja de acordo com as seguintes distâncias relativas entre o eletrodo superior e terra [4]:

- 2,5 a 3 m / MV para tensões CC;
- 2 a 2,5 m / MV para tensões de impulso atmosférico;
- até ou mais de 5 m / MV (rms) para tensões CA;
- até ou mais de 4 m / MV para tensões de impulso de manobra.

A Figura 1 a seguir está demonstrando o circuito simplificado de um divisor.

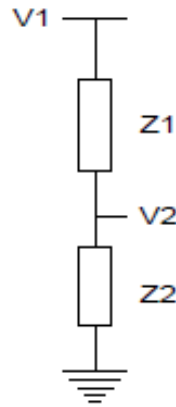


Figura 1: Circuito simples de um divisor de tensão.

Fonte: [5]

A tensão de saída (V2) da unidade de baixa tensão é definida pela equação 2.1.

$$V2 = \frac{Z2}{Z1 + Z2} \cdot V1 \quad (2.1)$$

Onde:

V1 - Alta tensão de entrada (V);

V2 - Baixa tensão de saída (V);

Z1 - Impedância da unidade de alta tensão;

Z2 - Impedância da unidade de baixa tensão.

O fator de escala (FE) de um divisor é o fator que é multiplicado pela tensão de saída a fim de encontrar sua grandeza de entrada. Para se obter essa relação utilizamos a equação 2.2.

$$V1 = FE \times V2 \quad (2.2)$$

Onde:

FE - Fator de escala;

V1 - Alta tensão de entrada (V);

V2 - Baixa tensão de saída (V);

## 2.1. Divisor de Tensão Resistivo

Os divisores de tensão resistivos são compostos por resistores em série,  $R_1$  está localizado na unidade de alta tensão e  $R_2$  na unidade de baixa tensão. Os valores de resistência variam conforme a necessidade, aplicação ou utilização dos divisores, o divisor resistivo pode ser utilizado em ensaios de alta tensão em corrente alternada (ATCA), alta tensão em corrente contínua (ATCC) e impulso atmosférico.

O divisor resistivo tem limitação em sistemas de medição de alta tensão em corrente alternada, pois quanto maior for a tensão, maior será o valor da resistência total, limitando a potência dissipada. Sendo assim, quanto maior a resistência maior será os efeitos das capacitâncias parasitas para terra [5].

O divisor projetado para medição em alta tensão em corrente alternada deve operar aproximadamente em até 100kV [5]. Uma amostra do divisor resistivo para aplicação em ATCA está ilustrada na Figura 2.

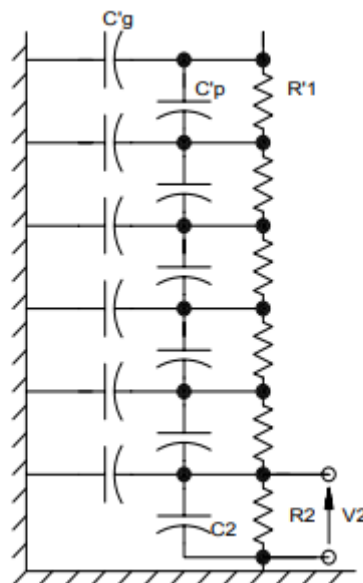


Figura 2: Amostra de um divisor resistivo para ATCA  
Fonte: [5]

Onde:

$R_1$  -  $nR'_1$  - Resistência da unidade de alta tensão;

$R_2$  - Resistência da unidade de baixa tensão;

$C'g$  - Capacitância parasita para a terra;

$C'p$  - Capacitância parasita paralela à unidade de alta tensão;

## C2 - Capacitância paralela à unidade de baixa tensão.

O divisor resistivo puro não é apropriado para trabalhar com altas frequências na faixa de mega-hertz [8], mas são utilizados em ensaios de impulsos atmosféricos cortados por possuírem uma resposta rápida. São construídos com uma baixa impedância e podem sobrecarregar o gerador de impulso, pois o mesmo reconhece o divisor como uma carga resistiva, diminuindo o rendimento do gerador. É necessário ajustar corretamente o gerador, alterando as resistências de frente e de cauda.

O divisor resistivo projetado para medição de impulsos atmosféricos, deve ter impedância  $R_1$  na ordem de  $k\Omega$  e  $R_2$  na ordem de  $\Omega$ . A Figura 3 representa um circuito equivalente, considerando as indutâncias e capacitâncias parasitas existentes.

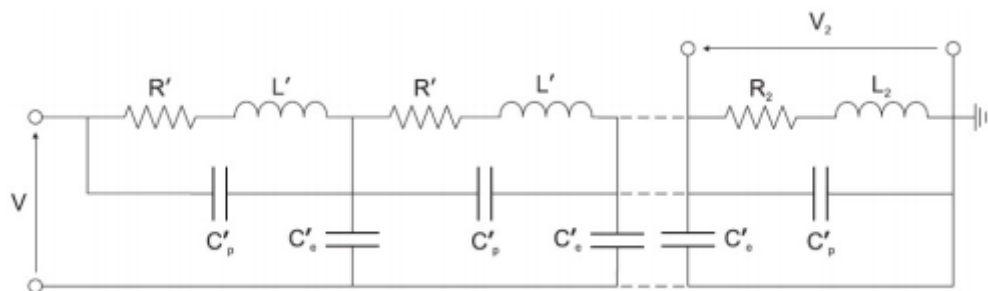


Figura 3: Circuito equivalente de um divisor de tensão resistivo  
Fonte: [8]

O divisor resistivo é mais utilizado para ensaios em alta tensão em corrente contínua, suas características internas detêm-se de uma resistência elevada, na faixa de grandeza de Mega ou Giga ohms. O divisor não sofrerá a interferência do aumento de temperatura devido a sua corrente limitada, a norma IEC 60060-2 determina que a mesma não poderá ser superior a 0,5 mA, com intuito de reduzir a incerteza de medição devido as correntes de fuga [2].

O divisor projetado para medição em alta tensão em corrente contínua, não deverá ter um dielétrico externo de valor proporcional à unidade de alta tensão, pois sendo da mesma grandeza a corrente da unidade de alta tensão do divisor se dividiria entre a unidade de alta tensão e sua superfície, inserindo uma impedância no circuito [7], ocasionando alterações no FE. É de extrema importância impossibilitar a existência de correntes de fuga na superfície do divisor, a fim de evitar instabilidades no FE.

A Figura 4 representa um circuito básico de um divisor resistivo.

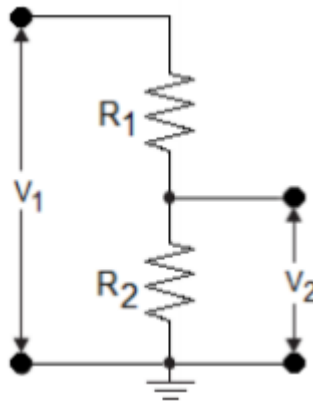


Figura 4: Circuito básico de um divisor de tensão resistivo  
Fonte: [7]

Desprezando as consequências das capacitâncias e indutâncias parasitas, o fator de escala do divisor pode ser representado por:

$$FE = \frac{V1}{V2} = \frac{R1}{R2} + 1 \quad (2.3)$$

Onde:

FE – Fator de escala;

V1 – Alta tensão de entrada (V);

V2 – Baixa tensão de saída (V);

R1 – Resistência de alta tensão ( $\Omega$ );

R2 – Resistência de baixa tensão ( $\Omega$ ).

A resistência equivalente entre dois resistores, se dá pela equação 2.4

$$R_{eq} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.4)$$

Onde:

$R_{eq}$  – Resistência equivalente ( $\Omega$ );

$R_1$  – Resistência total da carga 1 ( $\Omega$ );

$R_2$  – Resistência total da carga 2 ( $\Omega$ );

## 2.2. Divisor de Tensão Capacitivo

Os divisores resistivos são limitados pelas perdas de potência e pelas capacitâncias parasitas para terra, sendo o divisor capacitivo mais adequado para medições em alta tensão em corrente alternada (ATCA) e/ou impulsos lentos, como por exemplo o impulso de manobra. Sendo o divisor capacitivo limitado apenas por indutâncias internas e perdas dielétricas [6].

Os divisores de tensão capacitivos são compostos por capacitores em série, sendo C1 a impedância da unidade de alta tensão e C2 a impedância da unidade de baixa tensão, conforme a Figura 5. A unidade de alta tensão pode ser formada apenas por um capacitor, por uma bucha capacitiva de um equipamento (transformador e reator) [7] ou por vários capacitores associados em série, onde cada um tolerará parte da tensão. A unidade de baixa tensão é formada por capacitores associados em paralelo, seu dimensionamento dependerá do valor do fator de escala desejado e do instrumento a ser utilizado.

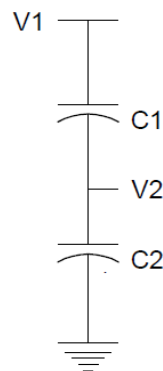


Figura 5: Circuito de um Divisor de Tensão Capacitivo  
Fonte: [6]

É considerado a construção do divisor para calcular o fator de escala, conforme a associação dos capacitores da unidade de alta e baixa tensão. O mesmo pode ser calculado através da equação 2.5.

$$FE = \frac{V1}{V2} = \frac{C2_{eq}}{C1} + 1 \quad (2.5)$$

Onde:

FE – Fator de escala;

V1 – Alta tensão de entrada (V);

V2 – Baixa tensão de saída (V);

C2<sub>eq</sub> – Capacitância equivalente de baixa tensão (F);

C1 – Capacitância total de alta tensão (F).

Quando a unidade de alta tensão é formada por vários capacitores em série, sua capacitância equivalente será dada pela equação 2.6:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (2.6)$$

Onde:

C<sub>eq</sub> – Capacitância equivalente de alta tensão (F);

n – Número de capacitores em série;

C<sub>i</sub> – Capacitância de cada capacitor (F).

A unidade de baixa tensão geralmente é formada pela associação em paralelo de vários capacitores, sua capacitância será dada pela equação 2.7:

$$C_2 = \sum_{i=1}^n C_i \quad (2.7)$$

Onde:

C2 – Capacitância de baixa tensão (F);

n - Número de capacitores em paralelo;

C<sub>i</sub> - Capacitância de cada capacitor (F).

A capacitância de baixa tensão (C2) possui a peculiaridade de ser afetada pela capacitância do cabo de transmissão (C<sub>c</sub>), sendo necessário somar as duas capacitâncias e formar uma capacitância equivalente de baixa tensão (C2<sub>eq</sub>), dada pela equação 2.8:

$$C2_{eq} = C2 + Cc \quad (2.8)$$

### 2.3. Divisor de Tensão Misto

O divisor de tensão misto é composto pela associação de resistores e capacitores em série. A unidade de alta tensão é formada por R1 e C1 respectivamente e a unidade de baixa tensão é formada pela combinação de resistores e capacitores em série e/ou paralelo. Para o dimensionamento das resistências, segue-se a mesma lógica utilizada em um divisor resistivo puro de baixa impedância e, para as capacitâncias a mesma de um divisor capacitivo.

Este modelo pode ser utilizado em ensaios de medição de alta tensão em corrente alternada, impulso atmosférico e impulso de manobra. Seu comportamento varia conforme a frequência de ensaio, em altas frequências ele se comporta como um divisor resistivo puro de baixa impedância e para baixas frequências, como um divisor capacitivo puro [6].

A Figura 6 mostra um circuito simples de um divisor de tensão misto

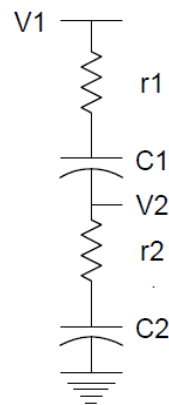


Figura 6: Circuito simples de um Divisor de Tensão Misto  
Fonte: [6]

Onde:

R1 = Resistencia de alta tensão ( $\Omega$ );

C1 = Capacitância de alta tensão (F);

R2 = Resistencia de baixa tensão ( $\Omega$ );

C2 = Capacitância de baixa tensão (F);

V1 = Tensão entrada (V);

$V_2$  = Tensão de saída (V).

#### 2.4. Divisor de Tensão Universal

O divisor de tensão universal é um conjunto de um divisor misto acoplado com uma coluna de resistores de alta impedância em paralelo. Podendo ser utilizado em ensaios de medição de alta tensão em corrente alternada (ATCA), impulsos e ainda sim medir alta tensão em corrente contínua (ATCC), devido a coluna de resistores em paralelo.

Para o dimensionamento das impedâncias segue-se a mesma lógica de um divisor misto e de um divisor resistivo puro de alta impedância, utilizados para ATCC. A Figura 7 mostra um circuito simples de um divisor de tensão universal.

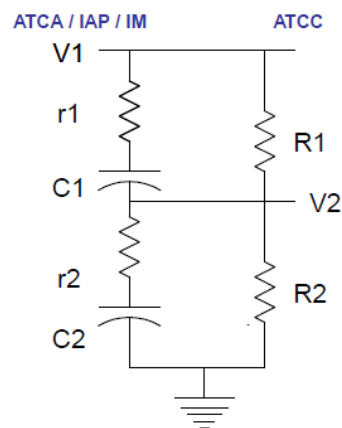


Figura 7: Circuito simples de um Divisor de Tensão Universal  
Fonte: [6]

Onde:

$V_1$  = Tensão de entrada;

$R_1$  = Resistencia de alta impedância e alta tensão;

$r_1$  = Resistencia de baixa impedância e alta tensão;

$C_1$  = Capacitância de alta tensão;

$R_2$  = Resistencia de alta impedância e baixa tensão;

$r_2$  = Resistencia de baixa impedância e baixa tensão;

$C_2$  = Capacitância de baixa tensão;

$V_2$  = Tensão de saída.

Para calcular a reatância capacitiva dos divisores acima, utiliza-se a equação 2.9.

$$X_c = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \quad (2.9)$$

Onde:

$X_c$  – Reatância Capacitiva ( $\Omega$ );

$f$  – Frequência (Hz);

$C$  – Capacitância (F);

### 3. ENSAIOS ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO

Os equipamentos de alta tensão devem suportar sua tensão nominal, que é fornecida pelo fabricante e possíveis sobretensões que possam ocorrer. Os ensaios elétricos de alta tensão têm como finalidade testar esses equipamentos, para que possam garantir seu funcionamento conforme as normas vigentes. Evitando possíveis falhas dielétricas dos materiais isolantes e condutores.

Os ensaios podem ser feitos em campo e/ou em laboratórios, são realizados durante a etapa de construção, chamados de ensaios de tipo e logo após a fabricação, chamados de ensaios rotineiros e caso seja possível, também são realizados ensaios durante o seu tempo de utilização [6].

Os procedimentos e requisitos de ensaio de alta tensão estão prescritos na norma IEC 60060-1 [1]. Sua amplitude e o tipo da tensão, variam de acordo com a tensão nominal do equipamento e seus requisitos de operação. Segundo a norma IEC 600-1 [1] a avaliação das medições só pode ser feita por um sistema de medição aprovado, é extremamente importante utilizar um sistema apropriado em estabilidade, desempenho, exatidão e linearidade, para os diferentes tipos de grandezas a serem medidas. Pois os resultados das medições serão a base para avaliar o desempenho do equipamento.

Existem diversos tipos de ensaios de alta tensão, a seguir serão apresentados os principais e suas definições. São eles: impulso atmosférico (pleno e cortado), impulso de manobra e alta tensão em corrente alternada e contínua.

#### 3.1. Impulso Atmosférico

Os impulsos atmosféricos são sobretensões de origem externa, resultantes de descargas atmosféricas que afetam o sistema ou refletem em suas redondezas. Segundo [8], “Sobretensão é uma condição que varia com o decorrer do tempo, cuja principal característica é possuir amplitudes maiores que o valor de crista de tensão de um sistema elétrico, lembrando que a tensão máxima trifásica é a tensão de pico dividida por raiz de três e monofásica é a própria tensão de pico”.



Figura 8: Sobretensão externa (Descarga elétrica atmosférica).  
Fonte: [6]

O isolamento dos equipamentos deverá levar em conta as sobretensões, fazendo-se necessário o ensaio dielétrico para assegurar que estes suportarão um elevado nível de tensão, os ensaios normalmente são realizados em laboratórios de alta tensão. Os impulsos atmosféricos são utilizados em equipamentos na faixa de tensão de 720V a 750kV, porque estão propensos a danos por descargas externas [8].

Segundo a norma IEC 60060-2 [2], a faixa de valores conforme cada impulso atmosférico deve ser avaliado entre o mínimo ( $t_{\text{mín}}$ ) e o máximo ( $t_{\text{máx}}$ ). O tempo de frente (T1) é denominado para impulsos atmosféricos plenos (IAP) e cortados na cauda (IACc) e o tempo até o corte (Tc) para impulsos cortados na frente (IACf).

### 3.1.1. Impulso Atmosférico Pleno

Os impulsos atmosféricos plenos são caracterizados por não serem interrompidos por uma descarga disruptiva, sendo retratado por uma onda completa. Esse evento ocorre devido a falha do isolamento do equipamento perante a uma perturbação elétrica.

A Figura 9 representa uma forma de onda padronizada com IAP.

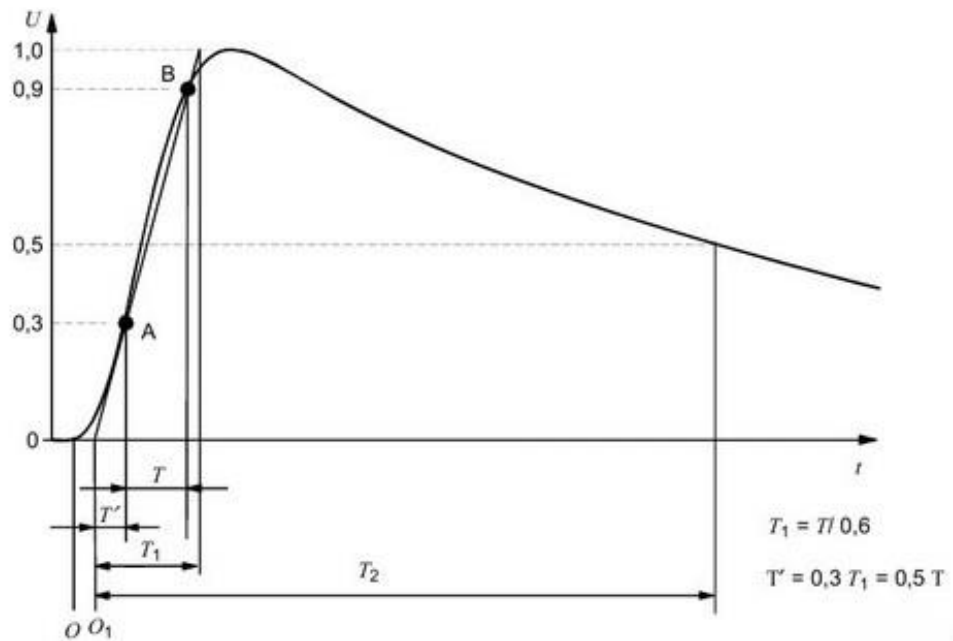


Figura 9: Parâmetros de tempo do Impulso Atmosférico Pleno.  
Fonte:[11]

Segundo a norma IEC 60060-1 [1], segue os parâmetros de um IAP.

- **O<sub>1</sub> (origem virtual)** – O instante que precede o correspondente ponto A da curva da tensão de ensaio com 0,3 T;
- **O (origem real)** – Instante em que começa a ser registrado o impulso de tensão;
- **A** – É o instante que corresponde a 30% da tensão de pico;
- **B** – O instante correspondente a 90% da tensão de pico;
- **T1 (tempo de frente)** – O parâmetro virtual definido como 1/0,6 vezes o intervalo de tempo T entre os instantes correspondentes a 30 % a 90 % do valor de crista na curva da tensão de ensaio;
- **T2 (tempo até o meio valor)** – O parâmetro virtual definido como intervalo entre a origem virtual O<sub>1</sub> e o instante no qual a curva de tensão de ensaio tenha decrescido até a metade do valor de ensaio.

### 3.1.2. Impulso Atmosférico Cortado na Frente (IACf)

O impulso atmosférico cortado na frente é caracterizado por uma rápida queda na tensão, causada por uma descarga disruptiva. Essa queda ocorre antes de o impulso atingir o seu valor máximo de tensão.

Para ser considerado um IACf as características do corte devem ter seu tempo de frente entre  $0,5 \mu\text{s}$  e  $2 \mu\text{s}$ . A Figura 10 representa a forma de onda de um impulso atmosférico cortado na frente.

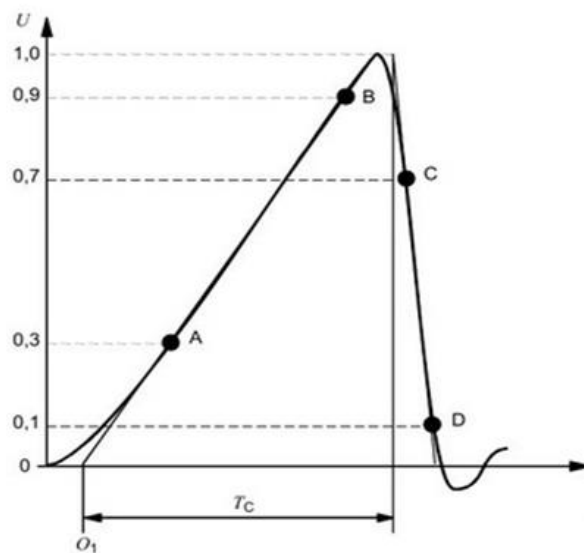


Figura 10: Forma de onda para impulso atmosférico cortado na frente.  
Fonte: [11]

Segundo a norma IEC 60060-1 [1], segue os parâmetros de um IACf

- **Tc (tempo de corte)** – É o intervalo entre a origem virtual e o instante de corte;
- **C e D** – 70% e 10%, respectivamente, da tensão imediatamente antes do colapso de tensão.

### 3.1.3. Impulso Atmosférico Cortado na Cauda (IACc)

O impulso atmosférico cortado na cauda também sofre uma queda de tensão causada por uma descarga disruptiva, essa queda ocorre depois que a tensão atinge seu valor máximo, no intervalo de caimento da forma de onda que é considerada a cauda.

Para ser considerado um IACc as características do corte devem ter seu tempo de corte entre  $2 \mu\text{s}$  e  $5 \mu\text{s}$ . A Figura 11 representa a forma de onda de um impulso atmosférico cortado na cauda.

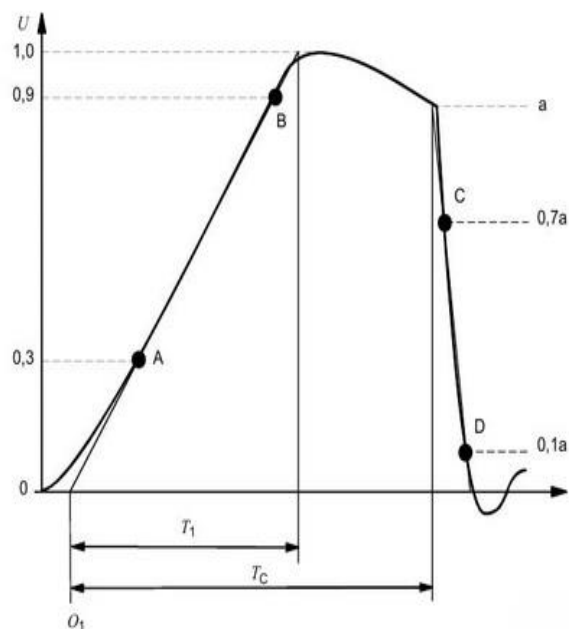


Figura 11: Forma de onda para impulso atmosférico cortado na cauda.  
Fonte: [11]

Segundo a norma IEC 60060-1 [1], segue os parâmetros de um IACc

- **O<sub>1</sub> (origem virtual)** – O ponto, no qual, ocorre às interseções da linha reta entre os pontos A e B, os mesmos correspondem a 30 % e 90 % dos valores de tensão, respectivamente;
- **T<sub>1</sub> (tempo de frente)** – É o parâmetro virtual definido como  $1/0,6$  vezes o intervalo de tempo T entre os instantes correspondentes a 30 % a 90 % do valor de crista na curva da tensão de ensaio;

- **Tc (tempo de corte)** – É o parâmetro virtual definido como o intervalo entre a origem virtual e o instante de corte.

### 3.2. Impulso de Manobra

Os surtos de manobra são sobretensões de origem interna, que normalmente são provenientes de equipamentos de manobra ou chaveamentos no sistema elétrico, a norma IEC 62271-102 [10] define os equipamentos de manobra como dispositivos elétricos designados a estabelecer ou interromper corrente elétrica em um ou mais circuitos elétricos [7]. Podendo estar em vários pontos do sistema, entre fases ou entre fase-terra, sua amplitude normalmente pode chegar até 4 pu.

Os impulsos de manobra (Figura 12) também são sobretensões rápidas na rede, mas quando comparado aos impulsos atmosféricos, possuem maior duração. Suas formas de onda normalizadas, são utilizadas para analisar os equipamentos nos ensaios elétricos. Essas formas de onda possuem um desempenho mais aleatório que o apontado nos impulsos atmosféricos, de acordo com o nível de tensão ou com a proximidade de materiais condutores ao equipamento, podem ocorrer descargas elétricas pelo local de ensaio.

A forma de onda deve ter tempo de frente entre 150  $\mu$ s e 500  $\mu$ s e tempo de cauda visto em aproximadamente 2500  $\mu$ s, para que seja considerada manobra. Por padrão, esse impulso possui um tempo de frente com duração de 250  $\mu$ s e tempo de cauda com 2500  $\mu$ s, conhecido como impulso 250/2500  $\mu$ s [8].

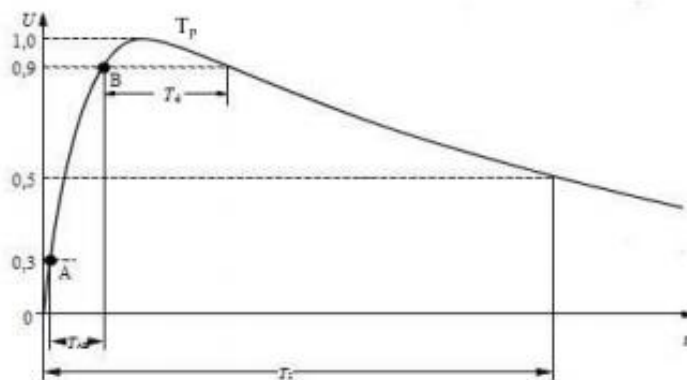


Figura 12: Curva de um Impulso de Manobra.  
Fonte: [6]

De acordo com a Figura 12, segue os parâmetros de um IM:

- **Ponto O (origem)** – Retrata o momento em que a curva registra um aumento ou uma diminuição da onda.
- **Tp (tempo de pico)** – É a distância entre o ponto O e o momento em que a máxima tensão é alcançada.
- **Td (tempo acima de 90%)** – É o instante em que a tensão do impulso ultrapassa os noventa por cento da tensão de ensaio.
- **T2 (tempo até meio valor)** – Retrata o instante em que a curva tem uma diminuição na tensão de ensaio até o meio valor de crista em relação ao ponto O.

A Tabela 1 a seguir representa as tolerâncias aceitáveis segunda a norma IEC 60060-1 [1], em relação aos parâmetros Tp e T2.

*Tabela 1 - Tolerâncias aceitáveis em relação aos parâmetros*

Parâmetro	Variação da tolerância	Tolerância
Tempo de frente	± 20%	Entre 200 µs e 300 µs
Tempo de cauda	± 60%	Entre 1000 µs e 4000 µs

Fonte: [3]

### 3.3. Alta Tensão em Corrente Alternada (ATCA)

Os ensaios elétricos em corrente alternada são os mais empregados, com a finalidade de testar o dielétrico dos equipamentos e averiguar sua conduta quando submetido a uma sobretensão causada por um distúrbio na rede elétrica.

Os testes normalmente são realizados em equipamentos que possuem características capacitivas, com capacitâncias variando de 10 pF a 10000 pF, Normalmente a origem dos defeitos analisados não são de curto-circuito, visto que as correntes geradas internamente não são elevadas, mas são originadas pelo elevado potencial em certos pontos da isolação que estão submetidos [12].

As tensões de ensaio normalmente são obtidas através de um transformador de potência elevador, ou por um circuito ressonante série ou paralelo [7], seus requisitos precisam ser monitorados. De acordo com a norma [1], a tensão de ensaio deve ser uma tensão alternada, geralmente com uma frequência na faixa de 45 Hz a 65 Hz, normalmente referida como frequência industrial. Ensaios especiais podem ser necessários em frequências consideravelmente abaixo ou acima dessa faixa.

A Figura 13 mostra alguns parâmetros da tensão para ensaios ATCA.

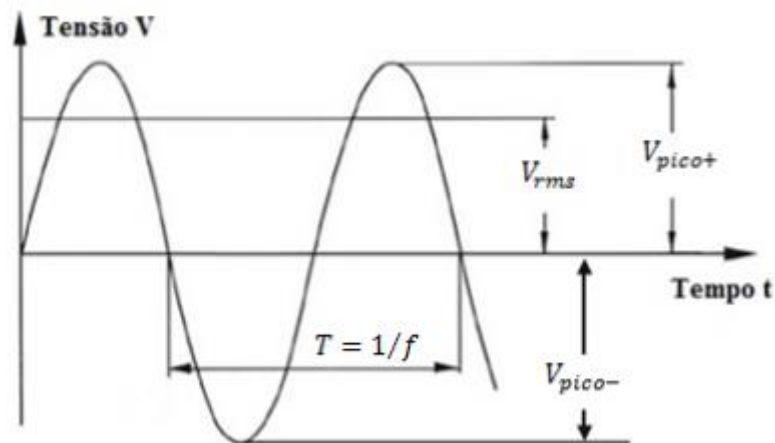


Figura 13: Parâmetros do sinal de tensão para ensaios ATCA.

Fonte: [7]

Segue os parâmetros da tensão de ensaio em ATCA.

- **Vcrista (Valor de crista)** – Média dos valores de pico positivo e negativo;
- **VT (Valor da tensão de ensaio)** – Valor de crista dividido por  $\sqrt{2}$ ;
- **Vrms (Valor eficaz)** – Raiz quadrada do valor médio dos quadrados dos valores de tensão durante um ciclo completo;
- **Fator de crista** – Relação entre o valor de crista e o valor eficaz;
- **f (Frequência)** – Quantidade de ciclos em 1 segundo;

### 3.4. Alta Tensão em Corrente Contínua (ATCC)

Assim como os ensaios em ATCA, em corrente contínua também tem por finalidade a verificação da suportabilidade dielétrica dos equipamentos do sistema de transmissão, como por exemplo os cabos de transmissão, isoladores e geradores CC. Além disso também é utilizado em ensaios de cabos com altas capacitâncias, que exigiriam uma corrente muito elevada caso fossem ensaiados em ATCA [7].

Atualmente o setor elétrico possui uma grande diversidade de equipamentos, necessitando de uma grande variedade de ensaios em ATCC. Esses ensaios devem ser monitorados a fim de garantir sua confiabilidade, sendo assim, foi estabelecido alguns parâmetros no sinal de tensão. Conforme a norma IEC 60060-1 [1], serão descritos os requisitos da tensão de ensaio para alta tensão em corrente contínua.

Segue os parâmetros da tensão de ensaio em ATCC.

- **Tensão de ensaio** – Valor médio aritmético;
- **Ondulação** – Desvio periódico do valor médio aritmético da tensão de ensaio;
- **Amplitude da ondulação** – Metade da diferença entre os valores máximo e mínimo da tensão de ensaio;
- **Fator de ondulação** – Relação entre a amplitude da ondulação e o valor da tensão de ensaio.

A Figura 14 explica melhor os parâmetros citados acima. Em azul está a tensão alternada  $V(t)$  que alimenta o sistema de geração de tensão contínua. Em vermelho a forma de onda de uma tensão contínua retificada em meia onda, mostrando sua componente alternada (*ripple*). Onde *ripple* é o Desvio periódico do valor médio aritmético da tensão de ensaio [7].

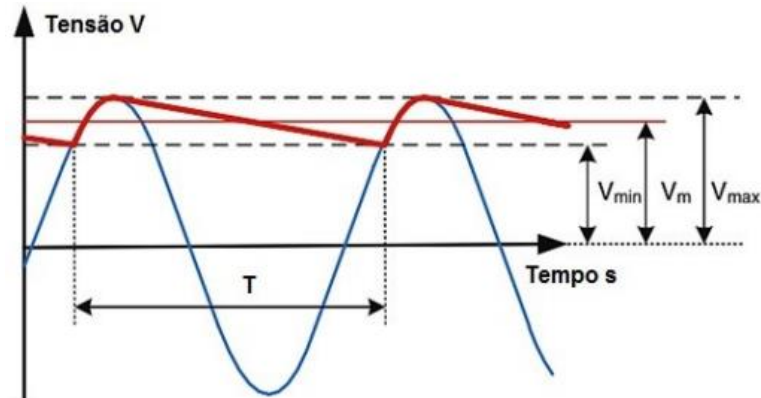


Figura 14: Parâmetros do sinal de tensão para ensaios ATCC.

Fonte: [7]

A tensão de ensaio  $V_m$  é dada pela média aritmética da tensão aplicada  $V(t)$  durante o período  $T$ . Normalmente a tensão aplicada é oscilante e periódica, devido ao carregamento e descarregamento dos capacitores. Sendo assim, o valor de  $V_m$  pode ser definido através da integral da tensão aplicada durante o período  $T$ , dividida pelo próprio período, conforme a equação 3.1.

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (3.1)$$

A amplitude da ondulação é a metade da diferença entre os valores máximo e mínimo da oscilação do sinal de tensão  $V(t)$ , sendo esta oscilação a componente alternada presente no sinal de tensão CC. Portanto, a amplitude da ondulação (*ripple*), é dada pela equação 3.2.

$$\delta V = \frac{1}{2} (V_{MAX} - V_{MIN}) \quad (3.2)$$

O Fator de ondulação (fator de *ripple*) é a relação entre a amplitude da ondulação e o valor da tensão de ensaio. O Fr é dado pela equação 3.3.

$$Fr = \frac{\delta V}{V_m} \times 100 \quad (3.3)$$

#### 4. MEDIÇÃO DE TENSÃO CONTÍNUA

A eletricidade teve início em corrente contínua (CC), tanto nos estudos quanto nas aplicações práticas. A primeira aplicação prática foi um telégrafo alimentado em corrente contínua por baterias eletromecânicas e utilizando a terra como um circuito de retorno [5]. Antigamente a tensão contínua era mais empregada em trabalhos de pesquisa científica, hoje em dia também é utilizada em indústrias e sistemas de transmissão.

O sistema de transmissão em alta tensão em corrente contínua (ATCC) é mais vantajoso se comparado ao em corrente alternada. Dentre suas vantagens, a redução das perdas é a mais relevante para transmissões em longas distâncias, pois as perdas por correntes capacitivas para terra seriam nulas. Entretanto, os sistemas de distribuição nos centros urbanos utilizam a tensão alternada, para a transmissão em ATCC seria necessário retificar a tensão alternada dos geradores e no final da transmissão utilizar inversores de tensão. A Figura 15 mostra as duas opções de transmissão em ATCC e ATCA.

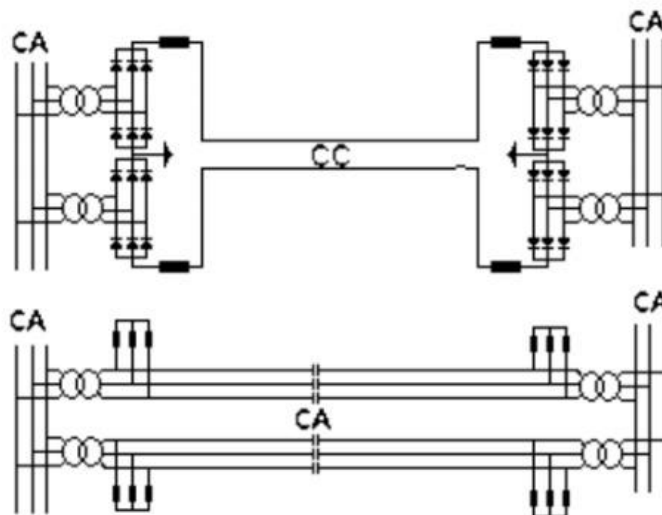


Figura 15: Transmissão em ATCC e ATCA.

Fonte: [5]

Na transmissão em ATCC é necessário um par de cabos, válvulas retificadoras e reatores para controlar a corrente, enquanto para a transmissão em ATCA são necessários três cabos e reatores, para evitar sobretensões durante o chaveamento da linha em função da alta capacitância [5].

Em laboratórios a tensão contínua é utilizada em diversos ensaios para testar a suportabilidade dielétrica dos equipamentos, a norma IEC 60060-2 [2] estabelece parâmetros e classificações para os ensaios e calibrações, conforme descrito nas próximas seções.

#### 4.1. Sistema de Medição

Um sistema de medição é formado por um conjunto de dispositivos apropriados para efetuar medições. Quando utilizados em alta tensão são nomeados SMAT, sendo constituídos por um dispositivo de conversão, um sistema de transmissão e instrumentos de medição. Quando um software for utilizado para avaliar os parâmetros das medições, o mesmo também fará parte do SM.

A Figura 16 representa um modelo básico dos componentes de um sistema de medição.

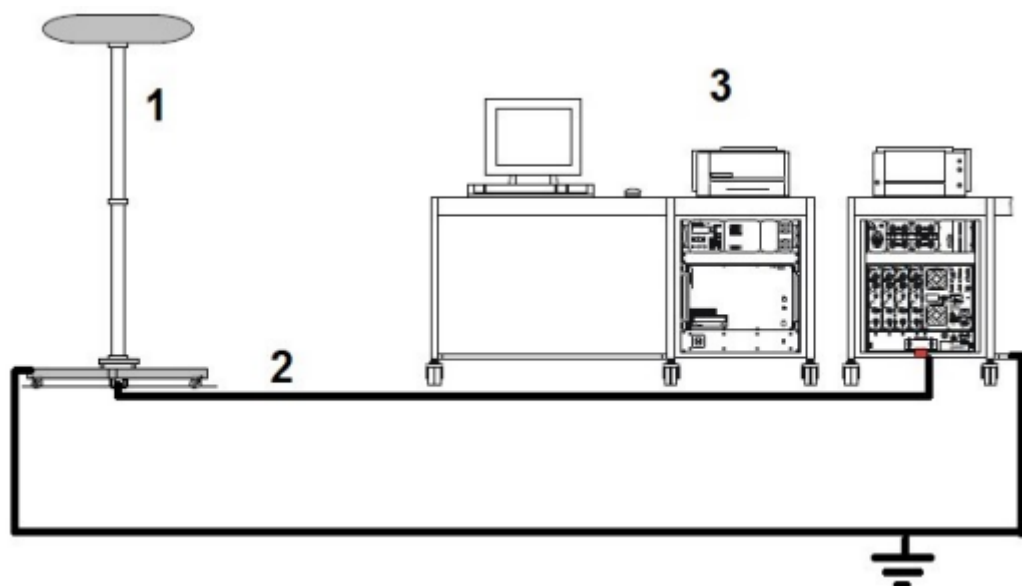


Figura 16: Componentes de um sistema de medição utilizado em alta tensão.

Fonte: [7]

Onde:

- 1 – Dispositivo de conversão
- 2 – Sistema de transmissão
- 3 – Instrumento de medição

Os sistemas de medição são classificados de acordo com seu nível de incerteza e eventualmente, sua aplicação. Segundo a norma IEC 60060-2 [2], um SM com uma incerteza de medição menor ou igual a 1% é denominado como um Sistema de Medição de Referência (SMR) e quando um SM apresentar uma incerteza menor ou igual a 3% é denominado um Sistema de Medição Aprovado (SMA).

#### 4.1.1. Sistema de Medição de Referência (SMR)

Um Sistema de Medição de Referência é aquele que apresenta uma incerteza menor ou igual a 1%, resultando em uma estabilidade e alta precisão capaz de aprovar outros sistemas, através de métodos comparativos de faixas de tensão e formas de onda. Sendo rastreáveis a outros sistemas a nível nacional e/ou internacional. De acordo com a norma IEC 60060-2 [2], um SMR pode ser usado como um Sistema de Medição Aprovado, mas um Sistema de Medição Aprovado não pode ser usado como de referência.

#### 4.1.2. Sistema de Medição Aprovado (SMA)

Para ser considerado um Sistema de Medição Aprovado, o mesmo deverá atender os requisitos da norma IEC 60060-2 [2] e apresentar conformidade. Sendo os requisitos gerais [2]:

- Calibração – É um procedimento que estabelece sob condições específicas a relação entre o valor compatível por um instrumento ou sistema de medição e o valor real da grandeza medida.
- Ensaio de Linearidade – Os valores do fator de escala do SM que devem ser medidos na tensão máxima e mínima e em 3 níveis distribuídos entre estes dois

extremos. Os espaçamentos entre os cinco níveis consecutivos devem ser igualmente espaçados entre eles. Os cinco valores do FE não podem variar mais que 1% em relação ao valor médio.

- Comportamento Dinâmico – A resposta de um componente ou um SM deve ser definida em condições específicas de uso, particularmente as distâncias de afastamento para as estruturas energizadas e aterradas. Os métodos de medição são a resposta amplitude/frequência para tensões CC ou CA, e determinação dos fatores de escala e parâmetros de tempo para tensões de impulso.

- Estabilidade a curto prazo – A máxima tensão da faixa de medição deve ser aplicada ao SM continuamente durante um período determinado para o uso previsto. O fator de escala deve ser medido quando a tensão máxima for atingida e novamente imediatamente antes que a tensão seja reduzida.

- Estabilidade a longo prazo – A estabilidade do FE deve ser avaliada e considerada durante um longo período e geralmente é estimada como uma contribuição da incerteza válida por um tempo previsto de utilização.

- Efeito da temperatura – A temperatura ambiente pode afetar o fator de escala de um sistema de medição. Isto pode ser avaliado pela determinação do fator de escala a diferentes temperaturas ambiente ou por cálculos, utilizando-se os coeficientes de temperatura dos elementos individuais.

- Efeito de proximidade – Os efeitos de proximidade causam variações do fator de escala ou de um parâmetro de um dispositivo, essas podem ser determinadas através de medições realizadas para diferentes distâncias do dispositivo em relação a estruturas energizadas ou paredes aterradas.

- Efeito do software – A maneira que o software trata a avaliação dos dados medidos pode introduzir uma incerteza que deve ser estimada. Isto pode ser realizado através da avaliação de um conjunto de dados de teste com valores de referência estabelecidos.

#### 4.2. Dispositivo de Conversão

O dispositivo de conversão é utilizado para reduzir a grandeza medida a valores compatíveis aos instrumentos de medição. Alguns exemplos são os transformadores de potencial, sensores de campo elétrico e os divisores de tensão.

Os transformadores de potencial resumem-se em um transformador em que a tensão do secundário em condições padrões de utilização, é consideravelmente correspondente à tensão do primário.

Os sensores de campo elétrico servem para que as medições da amplitude e da forma de onda em um campo elétrico sejam realizadas, pode ser aplicado para medir a forma de onda da tensão constituída pelo campo.

Os divisores de tensão são os mais utilizados em laboratórios, foram detalhados no capítulo 2 seus tipos construtivos e suas aplicações. Os mais indicados para medição de tensão contínua são os resistivos de alta impedância e o universal, mostrados na Figura 17.

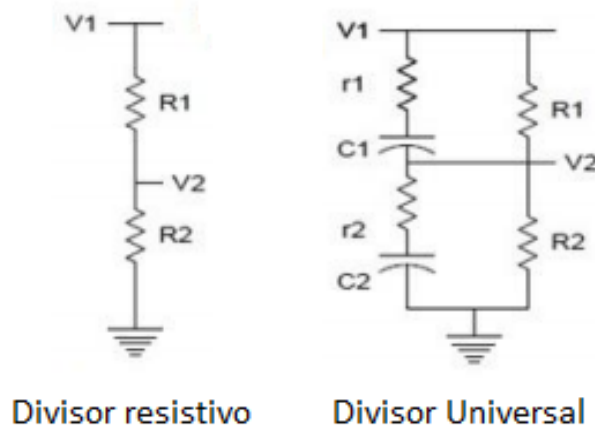


Figura 17: Esquema de construção do divisor resistivo e universal.

Fonte: [13]

#### 4.3. Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão é um conjunto utilizado para conectar o sinal de saída do dispositivo de conversão (divisor de tensão) ao instrumento indicador e/ou registrador. É constituído geralmente por um cabo coaxial com sua impedância de

terminação, podendo ser conectado em atenuadores, amplificadores ou outros dispositivos que se localizam entre os dispositivos de conversão e os instrumentos de medição.



Figura 18: Cabo coaxial componente do Sistema de Transmissão.

Fonte: [7]

#### 4.4. Instrumento de Medição

Os instrumentos de medição são dispositivos usados para registrar, quantificar e/ou indicar grandezas, tanto em alta tensão, como em média e baixa tensão. Alguns exemplos são os osciloscópios e os multímetros.

Os osciloscópios são usados para visualizar um sinal elétrico, permitindo captar valores imediatos de sinais elétricos rápidos, medindo frequências e diferenças de fase de oscilações, além de correntes e tensões elétricas.

Os multímetros são equipamentos eletrônicos capazes de medir grandezas elétricas. As medições mais realizadas com o multímetro são: medição de tensão contínua, resistência elétrica e tensão alternada.

#### 4.5. Ensaio em um Sistema de Medição Aprovado

Segundo a Norma IEC 60060-2 [2], existem requisitos para que se consiga a aprovação de um Sistema de Medição. Devem ser realizados ensaios de tipo, rotina e desempenho, os tipos de ensaio se encontram na Tabela 2.

Tabela 2: Ensaio requeridos para um sistema de medição de tensão CC aprovado

<b>Tipo de ensaio</b>	<b>Ensaio de tipo</b>	<b>Ensaio de rotina</b>	<b>Ensaio de desempenho</b>	<b>Verificação de desempenho</b>
Fator de escala na calibração			5.2	
Verificação do fator de escala				6.3
Linearidade, ver NOTA 2		5.3	5.3 (se aplicável)	
Comportamento dinâmico	5.4		5.3	
Estabilidade a curto prazo		5.5		
Estabilidade a longo prazo	5.6		5.6 (se aplicável)	
Efeito da temperatura ambiente	5.7			
Efeito da proximidade, ver NOTA 3	5.8 (se aplicável)		5.8 (se aplicável)	
Efeito do programa de computador (software)	5.9 (se aplicável)			
Ensaio de suportabilidade a seco no dispositivo de conversão	5.13	5.13 (se aplicável)		
Ensaio de suportabilidade sob chuva ou poluição no dispositivo de conversão	5.13 (se aplicável)			
Fator de escala do dispositivo de conversão	5.2.2	5.2.2		
Fator de escala do sistema de	5.2.2	5.2.2		

transmissão que não seja um cabo				
Fator de escala do instrumento de medição	5.2.2	5.2.2		
Responsabilidade	Nos componentes, pelo fabricante		No sistema pelo usuário, ver NOTA 1	
Taxa de repetição recomendada	Apenas uma vez (ensaios de tipo e rotina)		Pelo menos a cada 5 anos	Pelo menos anualmente
<p>NOTA 1: Recomenda-se que os ensaios listados acima sejam aplicados também aos componentes individuais, se os ensaios de desempenho forem realizados de acordo com o método alternativo (ver 5.2.2). Para obter a incerteza de medição do sistema de medição aprovado, convém que as incertezas dos componentes sejam combinadas.</p> <p>NOTA 2: Um ensaio de linearidade de acordo com 5.3 é somente necessário se a calibração não puder ser realizada por comparação ao longo da faixa de medição completa atribuída (5.2.1.2)</p> <p>NOTA 3: Investigação do efeito da proximidade no ensaio de desempenho é somente necessária se os dados do ensaio de tipo não forem suficientes.</p>				

Fonte: [2] adaptado pela autora (2020)

#### 4.6. Classificação de um Sistema de Medição

Os sistemas de medição são testados para verificar se os mesmos estão aptos para medir tensão de ensaios com níveis de incerteza dentro dos limites normativos, além de determinar o fator de escala e garantir que o sistema seja rastreável a padrões nacionais e/ou internacionais. Segundo a norma IEC 60060-2 [2] os testes de desempenho devem ser realizados periodicamente com o intuito de testar a confiabilidade do sistema.

As calibrações e verificações de desempenho possuem um intervalo de no mínimo um ano e no máximo cinco anos, dependendo do equipamento e condições de uso ao qual são submetidos. Caso haja alguma alteração do sistema, o mesmo deve ser calibrado novamente. Os registros de calibrações e verificações devem ser arquivados de modo que possa ser realizada uma análise da estabilidade do sistema em função do tempo. O fator de escala atribuído é determinado no ensaio mais recente de calibração. De acordo com a norma IEC 60060-2 [2] sua estabilidade deve estar

dentro da faixa, em  $\pm 3\%$  do fator de escala, para que não ocorram grandes variações em longos períodos.

Os sistemas utilizados para medições de tensão contínua devem medir o valor da tensão de ensaio (valor aritmético médio), com uma incerteza menor ou igual a 3% e apresentar um comportamento dinâmico que equipare às alterações das tensões. Sendo assim, a constante de tempo do sistema não deve ser superior a 0,25 s, aumentando ou diminuindo o nível de tensão com taxas na grandeza de 1% do valor da tensão de ensaio por segundo. O fator de escala na resposta em frequência não deverá variar por mais de  $\pm 15\%$  em toda faixa de frequência avaliada. Essa faixa se encontra entre 0,5 a 7 vezes a frequência fundamental da ondulação (*ripple*). O sistema de medição deve medir a amplitude da ondulação com uma incerteza inferior a 10%.

## 5. ONDULAÇÃO RESIDUAL

A fonte de corrente contínua mais comum é a bateria, que fornece energia elétrica através da conversão de energia química. Tradicionalmente as baterias têm baixas amplitudes e são utilizadas em baixa tensão.

A fonte de corrente contínua mais eficiente para amplitudes elevadas é obtida através das fontes de alimentação, que passam por um processo de retificação onde converte a tensão senoidal em tensão contínua.

No processo de retificação são utilizados elementos semicondutores, como os diodos, sua configuração determina o tipo de circuito retificador e suas aplicações. Além do processo de retificação, o sinal também passa pelo processo de filtragem que tem como objetivo deixar a forma de onda o mais próximo de uma tensão contínua pura. Isso ocorre através dos capacitores, que carregam e descarregam na carga, até que são carregados novamente e o ciclo se repete (conforme ilustrado na Figura 19). A variação entre o valor mínimo e máximo da onda na carga e descarga do capacitor é o que é chamado de ondulação residual mais conhecido como *ripple*, quanto mais capacitores forem adicionados mais tempo eles ficam carregados diminuindo o *ripple* da fonte. Apesar disso sempre haverá algum *ripple* por menor que ele seja, pois o capacitor terá que descarregar na carga.

Uma fonte CC confiável deve ter um fator de *ripple* baixo pois ele interfere na qualidade do sinal.

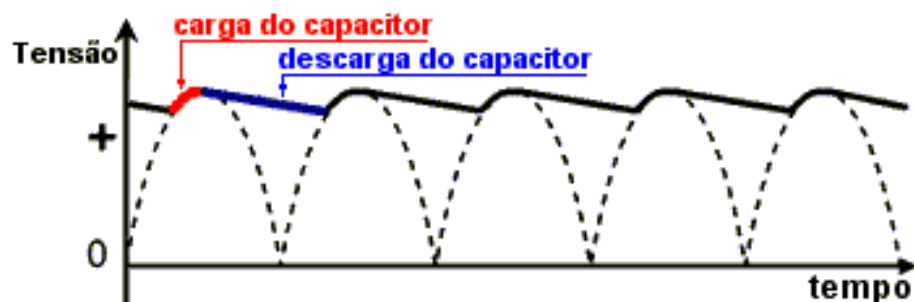


Figura 19: Ondulação (*ripple*) pós retificação.

Fonte:[14]

### 5.1. Fonte de Tensão em Corrente Contínua

O laboratório de referência em medição de alta tensão do Cepel (CA2) possui a fonte de tensão em corrente contínua da HAEFELY HIPOTRONICS série 8000 que é capaz de fornecer uma tensão contínua na faixa de 60 a 300 kV em um design em cascata e com polaridade reversível. Cada módulo individualmente é capaz de fornecer até 60 kV e corrente de 16 mA.

Para que o sistema de medição CC seja mais confiável, é necessário o uso de uma fonte estável. Esse sistema possui isolamento a ar e baixa ondulação (*ripple*) teórica de 0,2 % por mA. O laboratório CA2 possui 4 módulos podendo gerar uma tensão de até 240 kV.

A Figura 20 representa a fonte que constitui o sistema de medição de referência para calibração em CC do CA2.

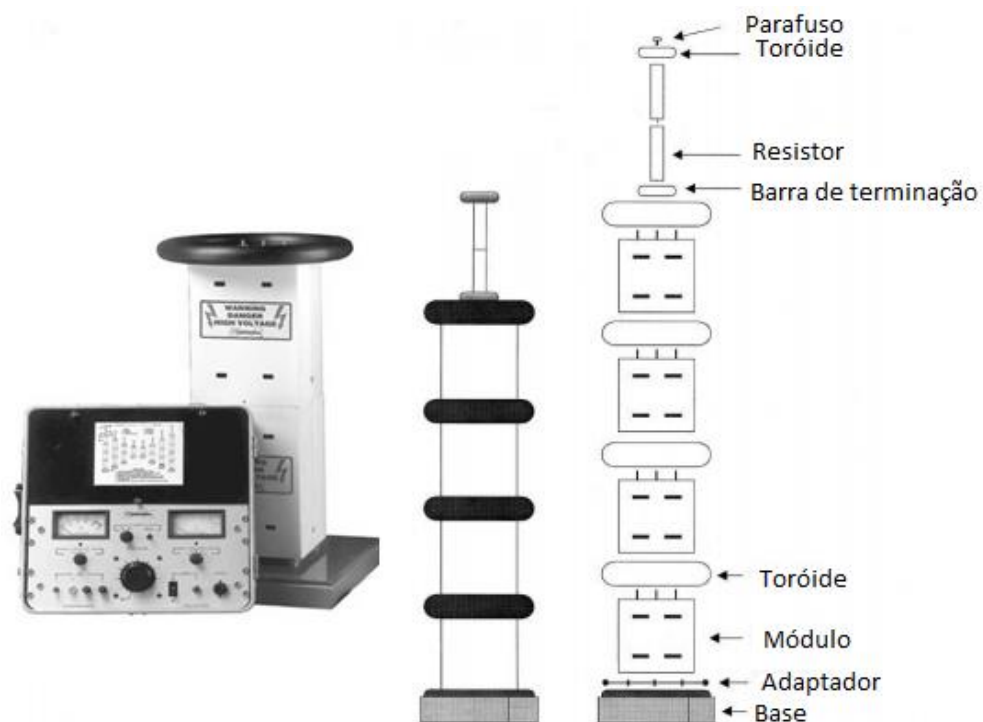


Figura 20: Fonte de Tensão Hipotronics série 8000 com 60 kV/módulo.

Fonte: [13]

## 5.2. Fonte de Tensão em Corrente Alternada

O sistema a seguir, é um conjunto de elementos com o objetivo de controlar a tensão na saída da fonte. Seu funcionamento, baseia-se em um regulador responsável por determinar o nível de tensão que irá sair da fonte. Pode-se dizer que este sistema é um grande variac, também conhecido como um autotransformador (componente o qual relaciona-se com as tensões de entrada e saída). O laboratório CA2 do Cepel possui a fonte de tensão da PHENIX TECHNOLOGIES, que é capaz de fornecer uma tensão alternada de até 200 kV e corrente de 1,5 A.

A Figura 21 mostra a fonte que compõe o sistema de medição de referência para calibração em CA do CA2.



Figura 21: Fonte regulável com tensão máxima de 200 kV.

Fonte: Autores (2020)

Essa fonte também é utilizada em CC com a adição do retificador de meia onda, diodo e capacitor. Será apresentado a seguir, os tipos de retificadores com suas respectivas funcionalidades.

### 5.3. Retificação

O circuito retificador equipara-se aos circuitos elétricos de tensão desenvolvidos para a conversão de corrente alternada em corrente contínua, é a forma mais eficiente e mais utilizada para se obter alta tensão contínua. Nesse processo de conversão CA-CC são utilizados componentes semicondutores, como os diodos retificadores e, de acordo com a sua configuração no circuito, pode ser utilizado para diversas aplicações. O diodo é o principal componente do circuito, em outras palavras refere-se ao dispositivo que transforma a corrente alternada (normalmente senoidal) em constante, mantendo apenas um semiciclo da onda senoidal, se forem de silício, causam uma queda de tensão de 0,6 V a 0,7 V, embora suportem tensões reversas de pico de 2500 V, sendo associados em série em retificadores de alta tensão, formando blocos de diodos, de maneira que, durante o período de não condução, a tensão reversa seja distribuída igualmente pelos diodos associados em série, obtendo assim a capacidade de suportar uma maior tensão reversa [7].

Apenas por retificação não é possível se obter uma tensão contínua, faz-se necessário a adição de capacitores para minimizar a perda na queda da onda. A Figura 22 demonstra o processo de conversão CA-CC que normalmente acontece em uma fonte de tensão. Na etapa de transformação, o transformador tem como finalidade aumentar ou diminuir a tensão que vai para o retificador, onde a corrente alternada é transformada em contínua. Na etapa de filtragem, o capacitor reduz a pulsação da tensão, gerando uma tensão com pequenas oscilações, conhecidas como ondulações residuais (*ripple*). Por fim, o sinal passa por um regulador para a estabilização, chegando na carga uma tensão filtrada e estabilizada.

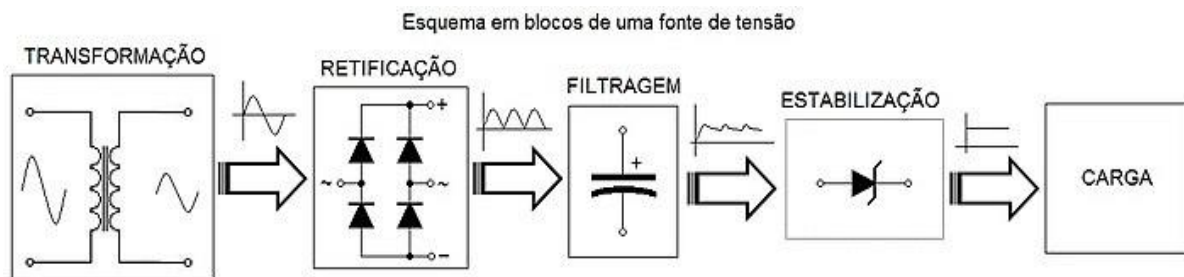


Figura 22: Processo de conversão CA-CC de uma fonte de tensão.  
Fonte: [15]

Existem diversos tipos de circuitos retificadores, neste trabalho serão apresentados os retificadores de meia onda, onda completa em ponte e em cascata.

### 5.3.1. Retificador de Meia Onda

O circuito retificador de meia onda possui apenas um diodo em série e é considerado o mais simples e menos eficiente comparado aos outros. Recebe o nome “meia onda” pois utiliza apenas meio ciclo da tensão de alimentação CA. A Figura 23 mostra o retificador em meia onda do laboratório CA2 do Cepel, onde C é o capacitor e D é o diodo.

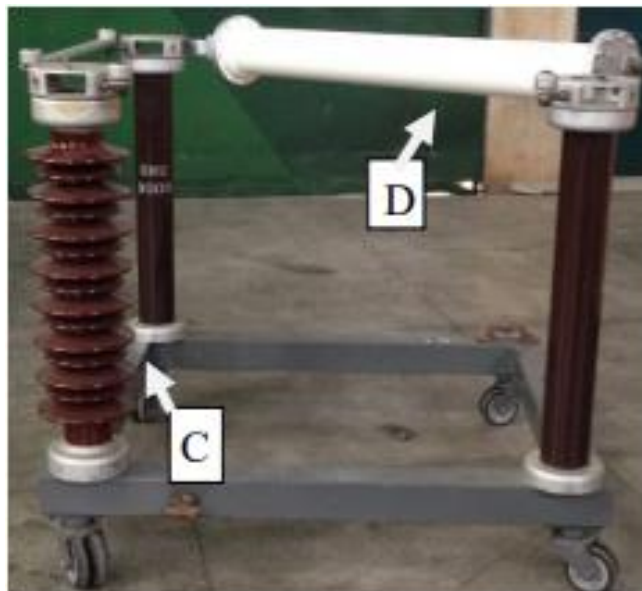


Figura 23: Retificador em meia onda do CA2.

Fonte: Autores (2020)

A Figura 24 representa um circuito completo com as reatâncias do transformador, a resistência de condução do diodo, e o capacitor não ideal, considerando todas as perdas elétricas ( $R_d$ ,  $r_d$ ,  $R_s$ ) e  $R_L$  a carga.

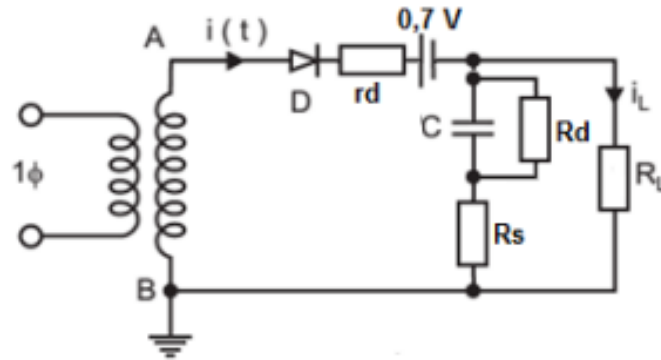


Figura 24: Circuito completo (com as perdas) do retificador em meia onda.

Fonte: [7]

As perdas citadas acima são desprezíveis. Deste modo, o circuito do retificador pode ser analisado por meio do circuito simplificado da Figura 25, no qual foram retiradas as reatâncias do transformador, a resistência de condução do diodo, e o capacitor é considerado ideal.

Seu funcionamento pode ser dividido em duas fases, uma no período de condução do diodo e a outra no período de não condução do mesmo. Inicialmente o capacitor (C) está descarregado, deste modo, quando a tensão do transformador (2) estiver subindo, o diodo (D) irá conduzir e o capacitor irá carregar, ele será carregado com a máxima tensão fornecida pelo transformador. Quando a tensão do transformador (2) começar a diminuir, o diodo (D) deixará de conduzir pois a tensão do carregamento do capacitor será maior que a fornecida pelo transformador (2), nesse período de não condução o capacitor passa a descarregar na carga (R), resultando na tensão de saída (3). No semiciclo em que não há condução, o diodo é submetido a uma tensão reversa igual a duas vezes a tensão máxima, devido à soma das tensões da fonte e do capacitor. Logo, os diodos devem ser dimensionados para suportarem esta tensão reversa [7].

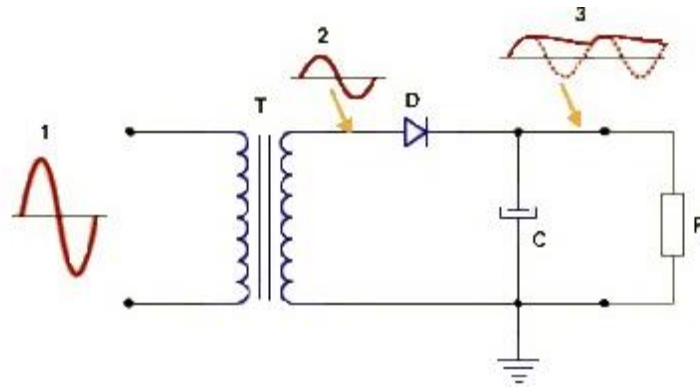


Figura 25: Circuito simplificado do retificador de meia onda.

Fonte: [16]

### 5.3.2. Retificador de Onda Completa em Ponte

O retificador de onda completa em ponte é o mais eficiente e o mais aplicado nos circuitos, utilizando quatro diodos no esquema intitulado “ponte”, faz a retificação nos dois semiciclos e sua grande vantagem é não precisar de um transformador com derivação central.

A Figura 26 representa um circuito simplificado da ligação de uma ponte retificadora. No secundário do transformador encontra-se uma forma de onda senoidal com semiciclos positivos e negativos, durante o semiciclo positivo os diodos D1 e D3 irão conduzir, fazendo uma corrente circular e chegar na saída uma tensão positiva. No semiciclo negativo, os diodos D2 e D4 irão conduzir, fazendo a corrente circular no mesmo sentido que no caso anterior, surgindo também uma tensão positiva na saída.

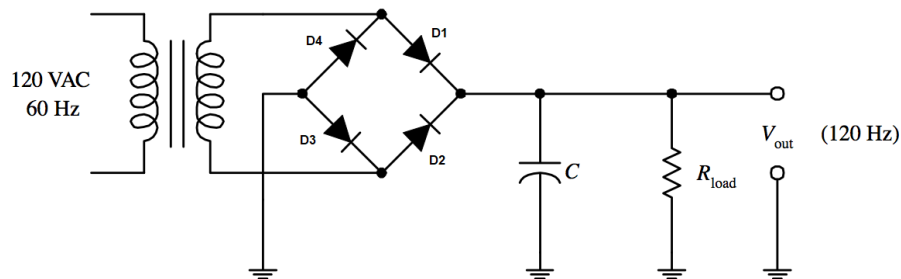


Figura 26: Circuito simplificado do retificador de onda completa em ponte.

Fonte: [17]

Nos retificadores de onda completa, temos em todos os semiciclos da tensão de entrada, uma tensão de saída. O nível de tensão contínua será o dobro em relação ao retificador de meia onda. A Figura 27 mostra o sinal senoidal de saída após passar pelo filtro capacitivo, com o intuito de um sinal mais constante conforme ilustra a linha vermelha a seguir.

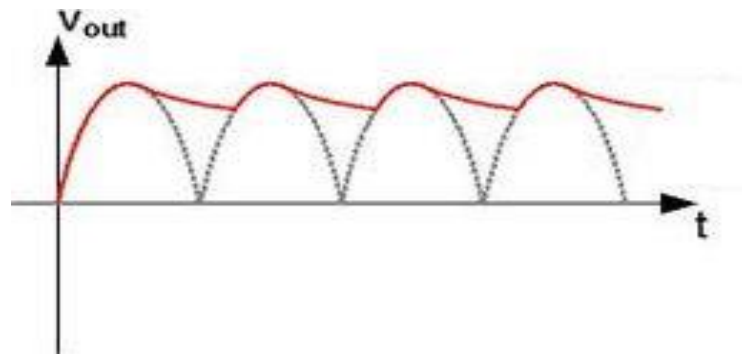


Figura 27: Sinal de saída pós filtro capacitivo.

Fonte: [15]

### 5.3.3. Retificadores em Cascata (COCKROFT-WALTON)

O retificador em cascata do tipo Cockcroft-Walton é um multiplicador que permite alcançar elevados níveis de tensão, sem precisar de uma fonte de alimentação muito elevada com componentes projetados especialmente. São usados em laboratórios de ensaio em alta tensão, a Figura 28 mostra um circuito típico encontrado no Cepel, que fornece altas tensões CC na faixa de 1 a 2 MV, com corrente de até 20 mA.



Figura 28: Retificador de tensão nominal de 1MV do tipo Cockcroft – Walton.

Fonte: [7]

É composto por um multiplicador de tensão em rede de capacitores e diodos para fornecer altas tensões. Esses multiplicadores são muito mais leves e mais baratos que os transformadores mesmo utilizando apenas capacitores e diodos em cascata. Outra vantagem da tensão do circuito multiplicador é o seu pico de tensão em cada estágio que será o dobro.

A Figura 29 mostra a operação de quatro estágios de um Cockcroft-Walton multiplicador.

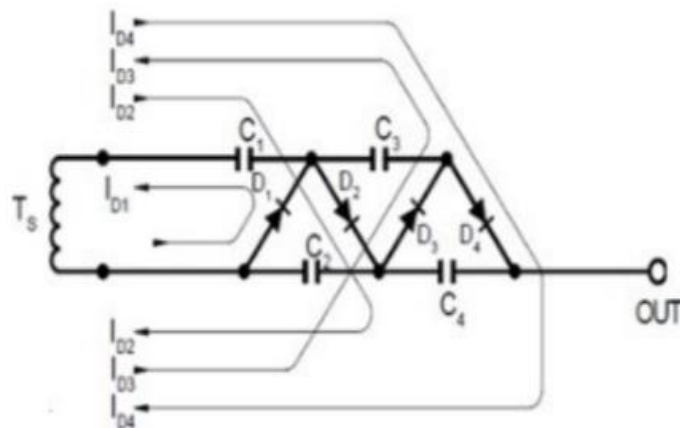


Figura 29: Cockcroft-Walton.

Fonte: [13]

- Quando  $T_s$  é negativo, o capacitor  $C_1$  carrega através do Diodo  $D_1$  a  $V_{\text{máx}}$ .
- Quando  $T_s$  é positivo, então  $V_{\text{máx}}$  adiciona o potencial de  $C_1$ , assim  $C_2$  dobra para  $2V_{\text{máx}}$  a tensão para  $D_2$ .
- Quando  $T_s$  é negativo novamente,  $C_3$  carrega  $2V_{\text{máx}}$  através do Diodo  $D_3$ .
- Quando  $T_s$  é novamente positivo, o capacitor  $C_4$  carrega o diodo  $D_4$  para  $4V_{\text{máx}}$ .

Logo, a saída do multiplicador é igual  $V_{\text{máx}} * N$ , onde  $N$  é o número de estágios do multiplicador.

#### 5.4. Filtragem

O circuito retificador converte um sinal alternado em um sinal contínuo, na saída resultante desse sistema é encontrado corrente contínua pulsante, estabelecida pelos semiciclos da corrente alternada sendo conduzidas pelo diodo. Essa corrente não pode ser utilizada pela maioria dos circuitos por não ser uma corrente contínua pura. Ela não é adequada para ser usada em alimentação, como em computadores, aparelhos de som etc. Sendo necessário a mesma passar pelo processo de filtragem, a fim de se tornar mais estável.

O processo de filtragem pode ser realizado de diferentes formas, a mais comum é com a utilização de capacitores, que funcionam como um reservatório de energia. O capacitor carrega nos semiciclos em que o diodo conduz com a tensão de pico do secundário do transformador, essa será a tensão de pico da rede quando o capacitor estiver totalmente carregado. Apesar disso, na prática a tensão não chega a atingir seu máximo, pois a fonte precisa fornecer corrente a um circuito externo. Assim, nos intervalos entre os semiciclos o capacitor fornece tensão para o circuito alimentado, não deixando a tensão cair ou deixando pouco. Com isso a tensão e a corrente variam muito pouco, e quanto maior o valor do capacitor menor será a amplitude do *ripple*

dependendo da carga, com uma variação menor a corrente se aproxima mais de uma corrente contínua pura.

A tensão que chega na carga depende do seu consumo de corrente, quando a corrente for muito baixa e o capacitor for grande o suficiente, ele carrega com a tensão de pico e entre os semiciclos sua descarga é quase nula (Figura 30).

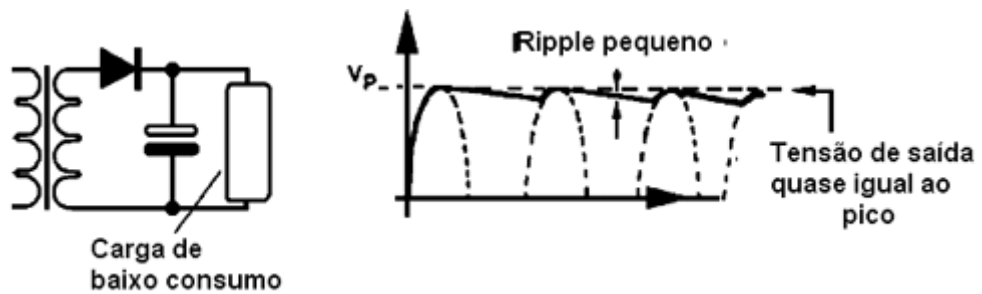


Figura 30: Filtragem com carga de baixo consumo.

Fonte: [18]

Quando a corrente na carga for elevada, a descarga parcial do capacitor entre os semiciclos faz a tensão média cair, chegando na carga um valor menor (Figura 31). Por isso a importância de equilibrar a tensão da fonte, o capacitor de filtragem e a corrente na carga.

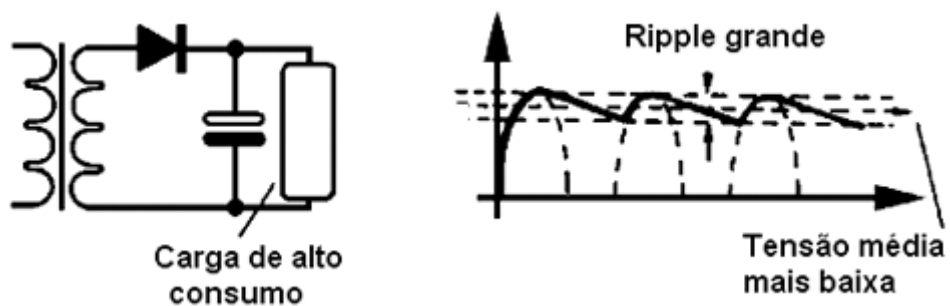


Figura 31: Filtragem com carga de alto consumo.

Fonte: [18]

Existem outros componentes que podem melhorar o processo de filtragem, como os resistores e indutores. A Figura 32 apresenta alguns filtros mais elaborados.

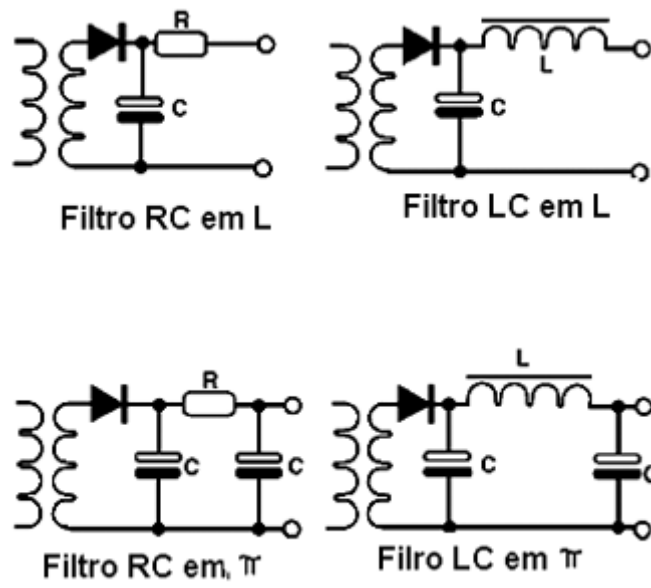


Figura 32: Outros modelos de filtros.

Fonte: [18]

## 6. ESTUDO COMPARATIVO

Foram realizadas diversas medições em alta tensão em corrente contínua nas dependências do CEPEL, no laboratório CA2. Com a finalidade de analisar a ondulação residual de cada caso proposto e validar o estudo aplicando os conhecimentos teóricos vistos anteriormente de forma prática. As medições foram realizadas com diferentes tipos construtivos de divisores de tensão e capacitores, cada arranjo formado foi ensaiado aplicando-se uma tensão de 9 kV em fontes CC e CA com retificação. Neste capítulo serão comparados os resultados obtidos através do osciloscópio, para verificar a aplicabilidade de cada caso e analisar a importância dos equipamentos utilizados, assim como suas influências.

### 6.1. Instrumentos Utilizados

#### Osciloscópio

Foi utilizado o osciloscópio digital Tektronix TDS5104B (Figura 33), que permite ao usuário construir suas próprias janelas de controle, entre outras características.



Figura 33: Osciloscópio Digital.

Fonte: Autores (2020)

#### Divisor Resistivo denominado SMR7

O divisor resistivo de referência, nomeado SMR7 (Figura 34), foi projetado no CEPEL utilizando resistores estáveis e com precisão de 1 %. A resistência total na

alta tensão é de 14,92 M $\Omega$ , na baixa tensão é de 5,11 k $\Omega$  e a tensão máxima CC é de 15 kV.



Figura 34: Divisor Resistivo SMR7.

Fonte: Autores (2020)

#### Divisor Resistivo de 50 kV

O divisor resistivo (Figura 35) foi projetado no CEPEL, sua resistência total na alta tensão é de 79,91 M $\Omega$ , na baixa tensão 99,77 k $\Omega$  e sua tensão máxima CC é de 50 kV.



Figura 35: Divisor Resistivo de 50 kV.

Fonte: Autores (2020)

#### Divisor Universal denominado SMR2

O divisor universal de referência SMR2 (Figura 36) é da fabricante HAEFELY, sua tensão máxima CC é de 180 kV, possui incerteza de 1 %, resistor primário paralelo de 225 M $\Omega$  e capacitância primária de 500 pF.



Figura 36: Divisor Universal SMR2.

Fonte: Autores (2020)

### Capacitor de 1,2 $\mu$ F

O capacitor da Figura 37 é da fabricante HAEFELY, possui uma capacitância de 1,2  $\mu$ F e sua tensão máxima é de 50 kV.



Figura 37: Capacitor de 1,2  $\mu$ F.

Fonte: Autores (2020)

## Capacitor do Retificador de Meia Onda

Este capacitor (Figura 38) está acoplado ao retificador de meia onda que foi projetado no Cepel e sua capacitância total é de 15 nF.



Figura 38: Capacitor de 15 nF.

Fonte: Autores (2020)

Além dos instrumentos citados acima, também foram utilizados: o retificador de meia onda e as fontes de tensão em corrente contínua e alternada do laboratório CA2, que foram especificados no capítulo 5.

Nota 1: Foram utilizados os capacitores de 1,2  $\mu\text{F}$  e 15 nF devido a ambos serem os únicos disponíveis que possuíam uma suportabilidade dielétrica de 9 kV

### 6.2. Arranjos

As medições foram montadas com diferentes equipamentos formando diversos arranjos, que serão descritos a seguir. Estes foram medidos por duas fontes:

#### 6.2.1. Fonte CC

- A. Divisor resistivo SMR7;
- B. Divisor resistivo SMR7 em paralelo com capacitor de 1,2  $\mu\text{F}$ ;

- C.** Divisor resistivo SMR7 em paralelo com capacitor de 15 nF;
- D.** Divisor resistivo SMR7 em paralelo com divisor resistivo de 50 kV;
- E.** Divisor resistivo SMR7, em paralelo com divisor resistivo de 50 kV e em paralelo com capacitor de 1,2  $\mu$ F;
- F.** Divisor resistivo SMR7, em paralelo com divisor resistivo de 50 kV e em paralelo com divisor universal SMR2;
- G.** Divisor universal SMR2.

#### 6.2.2. Fonte CA com Retificador de Meia Onda

- H.** Divisor resistivo SMR7 sem o filtro do retificador;
- I.** Divisor resistivo SMR7;
- J.** Divisor resistivo SMR7 em paralelo com divisor resistivo de 50 kV;
- K.** Divisor resistivo SMR7, em paralelo com divisor resistivo de 50 kV e em paralelo com capacitor de 1, 2  $\mu$ F;
- L.** Divisor resistivo SMR7, em paralelo com divisor resistivo de 50 kV e em paralelo com divisor universal SMR2;
- M.** Divisor universal SMR2.

Nota 1: O retificador de meia onda possui um capacitor de 15 nF, o qual pode ser removido do circuito. Esta situação se encontra apenas no primeiro arranjo.

Nota 2: As imagens dos arranjos acima encontram-se no apêndice 1.

### 6.3. Memória de Cálculo

Para a determinação do fator de *ripple* dos arranjos acima, primeiramente utilizou-se a equação 3.2 para calcular a amplitude da ondulação. Em seguida o valor encontrado foi inserido na equação 3.3.

$$\mathbf{A} \quad Fr = \frac{62,2 \text{ mV}}{3,08 \text{ V}} \times 100 = 2,02 \% \quad (6.1)$$

$$\mathbf{B} \quad Fr = \frac{0,9 \text{ mV}}{2,91 \text{ V}} \times 100 = 0,03 \% \quad (6.2)$$

$$\mathbf{C} \quad Fr = \frac{14,6 \text{ mV}}{2,90 \text{ V}} \times 100 = 0,5 \% \quad (6.3)$$

$$\mathbf{D} \quad Fr = \frac{66,8 \text{ mV}}{2,89 \text{ V}} \times 100 = 2,31 \% \quad (6.4)$$

$$\mathbf{E} \quad Fr = \frac{0,92 \text{ mV}}{2,88 \text{ V}} \times 100 = 0,03 \% \quad (6.5)$$

$$\mathbf{F} \quad Fr = \frac{65,6 \text{ mV}}{2,87 \text{ V}} \times 100 = 2,28 \% \quad (6.6)$$

$$\mathbf{G} \quad Fr = \frac{27,6 \text{ mV}}{7,14 \text{ V}} \times 100 = 0,39 \% \quad (6.7)$$

$$\mathbf{H} \quad Fr = \frac{2340 \text{ mV}}{2,22 \text{ V}} \times 100 = 105,31 \% \quad (6.8)$$

$$\mathbf{I} \quad Fr = \frac{134 \text{ mV}}{4,16 \text{ V}} \times 100 = 3,23 \% \quad (6.9)$$

$$\mathbf{J} \quad Fr = \frac{150 \text{ mV}}{4,08 \text{ V}} \times 100 = 3,68 \% \quad (6.10)$$

$$\mathbf{K} \quad Fr = \frac{2,38 \text{ mV}}{3,97 \text{ V}} \times 100 = 0,06 \% \quad (6.11)$$

$$\mathbf{L} \quad Fr = \frac{151 \text{ mV}}{4,06 \text{ V}} \times 100 = 3,72 \% \quad (6.12)$$

$$\mathbf{M} \quad Fr = \frac{25 \text{ mV}}{10,57 \text{ V}} \times 100 = 0,24 \% \quad (6.13)$$

Para a determinação da resistência equivalente e reatância capacitiva dos arranjos acima, utilizou-se as equações 2.4 e 2.9 respectivamente.

$$\mathbf{B} \quad X_c = \frac{1}{2 \times \pi \times 676 \times 1,2 \times 10^{-6}} = 196,2 \Omega \quad (6.14)$$

$$\mathbf{C} \quad X_c = \frac{1}{2 \times \pi \times 121 \times 15 \times 10^{-9}} = 87,7 \text{ k}\Omega \quad (6.15)$$

$$\mathbf{D} \quad R_{eq} = \frac{14,93 \text{ M} \times 80 \text{ M}}{14,93 \text{ M} + 80 \text{ M}} \quad (6.16)$$

$$= 12,6 \text{ M}\Omega$$

$$\mathbf{E} \quad X_c = \frac{1}{2 \times \pi \times 841 \times 1,2 \times 10^{-6}} = 157,7 \Omega \quad (6.17)$$

$$\mathbf{F} \quad R_{eq} = \frac{12,6 \text{ M} \times 225 \text{ M}}{12,6 \text{ M} + 225 \text{ M}} \quad (6.18)$$

$$= 11,93 \text{ M}\Omega$$

$$\mathbf{G} \quad X_c = \frac{1}{2 \times \pi \times 122 \times 500 \times 10^{-12}} \quad (6.19)$$

$$= 2,62 \text{ M}\Omega$$

$$\mathbf{I} \quad X_c = \frac{1}{2 \times \pi \times 60 \times 15 \times 10^{-9}} = 176,8 \text{ k}\Omega \quad (6.20)$$

$$\begin{aligned} \text{K} \quad X_c &= \frac{1}{2 \times \pi \times 116 \times 1,22 \times 10^{-6}} & (6.21) \\ &= 1,13 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{L} \quad X_c &= \frac{1}{2 \times \pi \times 60 \times 15,5 \times 10^{-9}} & (6.22) \\ &= 171,1 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Nota 1: Os valores encontrados na equação 6.16 também se aplicam nos arranjos E, J e K.

Nota 2: Os valores encontrados na equação 6.18 também se aplica no arranjo L.

Nota 3: Nos arranjos A, B, C, G, H, I e M, não foi calculado a resistência equivalente pois possuem apenas um divisor.

#### 6.4. Resultados Obtidos

Após os cálculos, os valores obtidos foram organizados conforme as Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Resumo dos resultados obtidos com a fonte CC

Fonte CC				
Arranjos	Vrms (V)	Vpp (mV)	Vamplitude (mV)	Fator de <i>ripple</i> (%)
A	3,08	124,4	62,2	2,02
B	2,91	1,8	0,9	0,03
C	2,91	29,2	14,6	0,50
D	2,89	133,6	66,8	2,31
E	2,88	1,84	0,92	0,03
F	2,87	131,2	65,6	2,28
G	7,14	55,2	27,6	0,39

Fonte: Autores (2020)

Tabela 4: Resumo dos resultados obtidos com a fonte CA  
**Fonte CA com Retificador de Meia Onda**

Arranjos	Vrms (V)	Vpp (mV)	Vamplitude (mV)	Fator de <i>ripple</i> (%)
H	2,22	4680	2340	105,31
I	4,16	268	134	3,23
J	4,08	300	150	3,68
K	3,97	4,76	2,38	0,06
L	4,06	302	151	3,72
M	10,57	50	25	0,24

Fonte: Autores (2020)

## 6.5. Resultados Comparativos

### 6.5.1. Análise com a Fonte CC

Com os resultados obtidos, percebe-se uma diferença clara do fator de *ripple* quando se utiliza um capacitor no circuito, isso se mostra comparando o arranjo A com o arranjo B. No qual o arranjo A não possui a presença do capacitor, resultando em um fator de *ripple* de 2,02%, enquanto o arranjo B que possui capacitância, resultou em um fator de *ripple* de 0,03%. Isso se dá devido a inserção do capacitor que fornece uma reatância capacitiva de 196,2  $\Omega$ , que está em paralelo com a carga de 14,93 M $\Omega$ , forçando a corrente passar pelo sistema de filtragem.

Comparando os arranjos B e C, observa-se que o valor da capacitância também influencia no fator de *ripple*. Pois, no arranjo B foi obtido um Fr de 0,03% utilizando um capacitor de 1,2  $\mu\text{F}$ , que fornece uma reatância de 196,2  $\Omega$ . Enquanto no arranjo C o Fr encontrado foi de 0,5% com o capacitor de 15 nF que gera uma reatância de 87,7 k $\Omega$ . Nota-se então que fator de *ripple* é inversamente proporcional à capacitância de filtragem.

Examinando os arranjos A e D, observa-se uma diferença no fator de *ripple* desprezível, porém já era esperado. Pois no arranjo A possui uma impedância de 14,93 M $\Omega$ , enquanto no arranjo D, essa impedância encontra-se em paralelo com 80 M $\Omega$  resultando em uma impedância equivalente de 12,6 M $\Omega$ , ou seja, a variação resistiva entre os dois arranjos não é significativa para alterar o fator de *ripple* a ponto

de ser perceptível. Os fatores de *ripple* dos arranjos A e D encontrados foram de 2,02% e 2,31% respectivamente.

Observando os arranjos D e E, nota-se que o capacitor de 1,2  $\mu\text{F}$  se mostrou eficiente na faixa de 120 Hz. Pois no arranjo D foi obtido um Fr de 2,31% com uma impedância equivalente de 12,6  $\text{M}\Omega$ , e no arranjo E o Fr encontrado foi de 0,03%, pois com a inserção do capacitor, foi fornecido uma reatância de 157,7  $\Omega$ . Como no caso anterior a corrente passará preferencialmente pelo sistema de filtragem.

Analisando os arranjos D e F e comparando seus fatores de *ripple*, nota-se que a interferência causada pelo divisor universal no circuito é desprezível, pois possui uma capacitância baixa resultando em uma reatância alta de 2,62  $\text{M}\Omega$ , essa reatância em paralelo com a resistência de 11,93  $\text{M}\Omega$  não força a corrente a passar totalmente pelo capacitor. Além disso, também pode estar sofrendo interferências externas causadas pelos outros divisores do circuito, como por exemplo as capacitâncias parasitas.

Porém quando o divisor universal foi ensaiado sozinho, conforme o arranjo G, pode-se observar que a reatância de 2,62  $\text{M}\Omega$  gerada pelo capacitor fica em paralelo com a resistência de 225  $\text{M}\Omega$ , forçando a corrente a passar preferencialmente pelo capacitor, devido a isso, o fator de *ripple* diminuiu para 0,39 %. Portanto nessa condição o capacitor funciona como um filtro.

#### 6.5.2. Análise com a Fonte CA

Nas medições com a fonte CA foi utilizado o retificador de meia onda, o qual possui um capacitor que se mostrou imprescindível. Isso se prova observando o resultado do fator de *ripple* de 105,31% encontrado no arranjo H, que não possui a presença do mesmo. Portanto a utilização do retificador de meia onda sem o capacitor torna-se inaplicável.

No arranjo I foi adicionado o capacitor do retificador de 15 nF que fornece uma reatância de 176,8  $\text{k}\Omega$ , forçando a corrente passar pelo sistema de filtragem. Diminuindo o fator de *ripple* para 3,23%. Nota-se que, apesar da redução ter sido significativa, o mesmo ainda se encontra fora das exigências estabelecidas pela norma IEC 60060-1 [1].

Comparando os arranjos I e J, observa-se uma diferença no fator de *ripple* insignificante. Pois o arranjo I possui uma impedância de 14,93  $\text{M}\Omega$ , enquanto o

arranjo J, essa impedância encontra-se em paralelo com  $80\text{ M}\Omega$  resultando em uma impedância equivalente de  $12,6\text{ M}\Omega$ , ou seja, a variação resistiva entre os dois arranjos não é relevante o suficiente para modificar o fator de *ripple* a ponto de ser perceptível. Os fatores de *ripple* dos arranjos I e J encontrados foram de 3,23% e 3,68% respectivamente.

Analisando os arranjos J e K, nota-se que o capacitor de  $1,2\text{ }\mu\text{F}$  também se mostrou eficiente em frequências na faixa de 60 Hz. O arranjo J possui apenas o capacitor de  $15\text{ nF}$  com uma reatância de  $176,8\text{ k}\Omega$ , enquanto o arranjo K além do capacitor de  $15\text{ nF}$  possui também o de  $1,2\text{ }\mu\text{F}$  fornecendo então uma reatância de  $1,13\text{ k}\Omega$  e o resultado encontrado foi uma diminuição expressiva no fator de *ripple*, que caiu de 3,68% para 0,06%.

A fim de se saber a influência do divisor universal no circuito, o mesmo foi adicionado no arranjo L e comparado com o arranjo J. De maneira semelhante ao que foi visto no arranjo F comparado com D, sua influência pode ser desconsiderada.

Entretanto ao utilizar o divisor universal sozinho no circuito, conforme o arranjo M, percebe-se que o fator de *ripple* diminui consideravelmente, pois o mesmo se comporta de maneira similar ao arranjo G.

## 6.6. Análise Gráfica

### Fonte CC

Antes de iniciar às análises, vale ressaltar que o canal 1 em amarelo é a tensão de saída em CC e o canal 2 em azul é a tensão de *ripple*.

Dito isto, ao analisar as Figuras 39 e 40 que representam as formas de onda dos arranjos A e B respectivamente. Observa-se que sem a presença do capacitor (Figura 39), o sinal encontrado é mais oscilante devido a um *ripple* maior.

Ao adicionar uma capacitância muito alta para o circuito (Figura 40), o capacitor passa a segurar toda a carga resultando em um circuito quase linear. Devido a esse fato, a tensão de *ripple* passa a ser tão pequena que mesmo na menor escala do osciloscópio ( $1\text{ mV}$  por divisão), não se consegue ver a forma de onda corretamente, enxergando mais o ruído causado pelo ambiente.

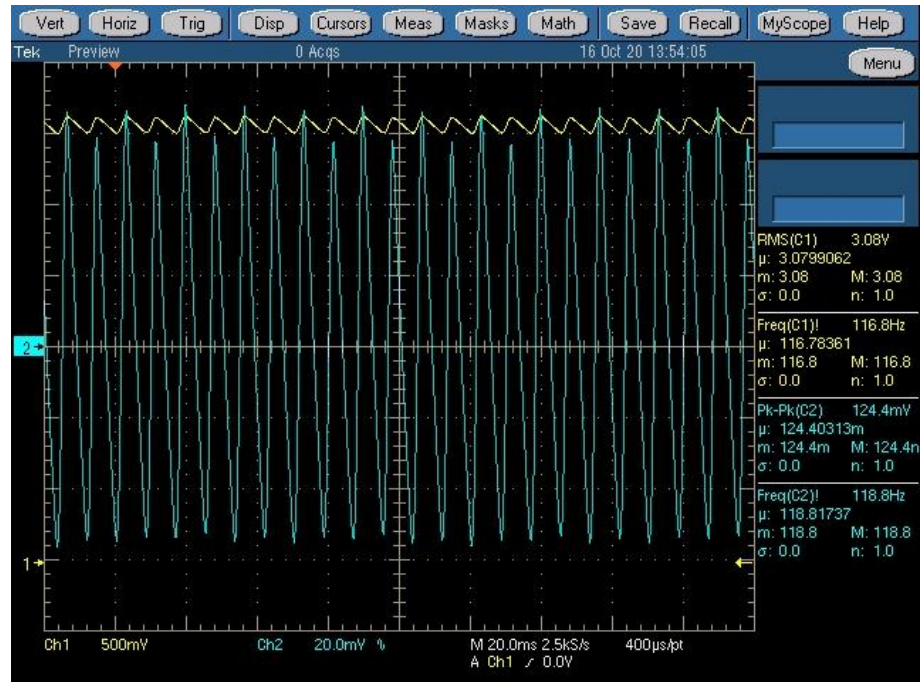


Figura 39: Forma de onda do arranjo A.

Fonte: Autores (2020)

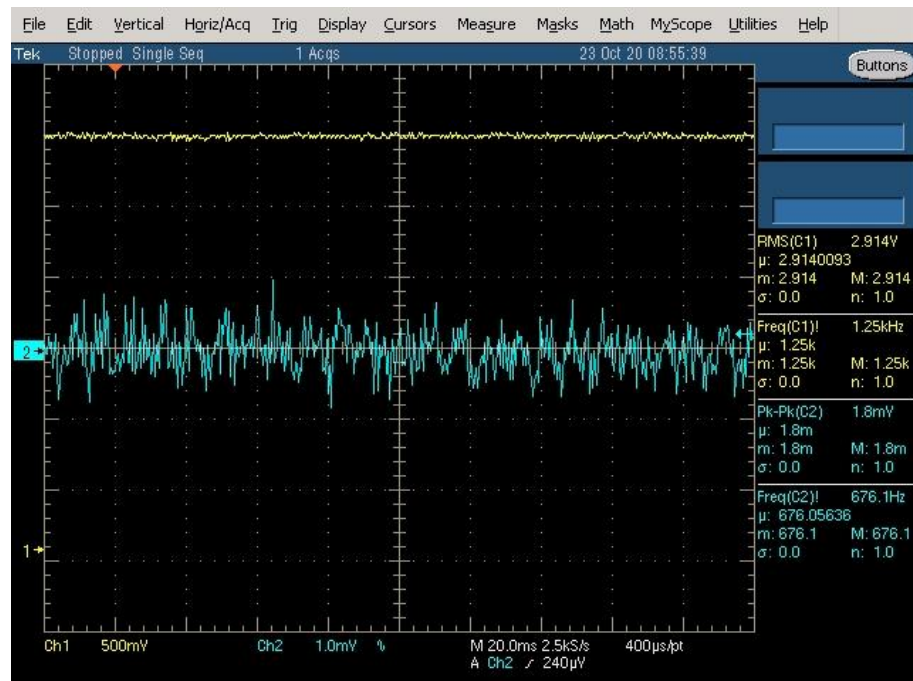


Figura 40: Forma de onda do arranjo B.

Fonte: Autores (2020)

## Fonte CA com Retificador de Meia Onda

Quando o retificador de meia onda está sem capacitância (Figura 41), o circuito não possui diferença entre o sinal de entrada e a saída CC, ou seja, todo o sinal está oscilante, reproduzindo 100% de *ripple*.

Com o capacitor adicionado, o mesmo é carregado no momento que a tensão está subindo e a energia armazenada é dissipada ao longo do circuito no período em que a tensão está descendo. Sendo assim a forma de onda encontrada deixa de ser senoidal e passa a ser dente de serra (Figura 42).

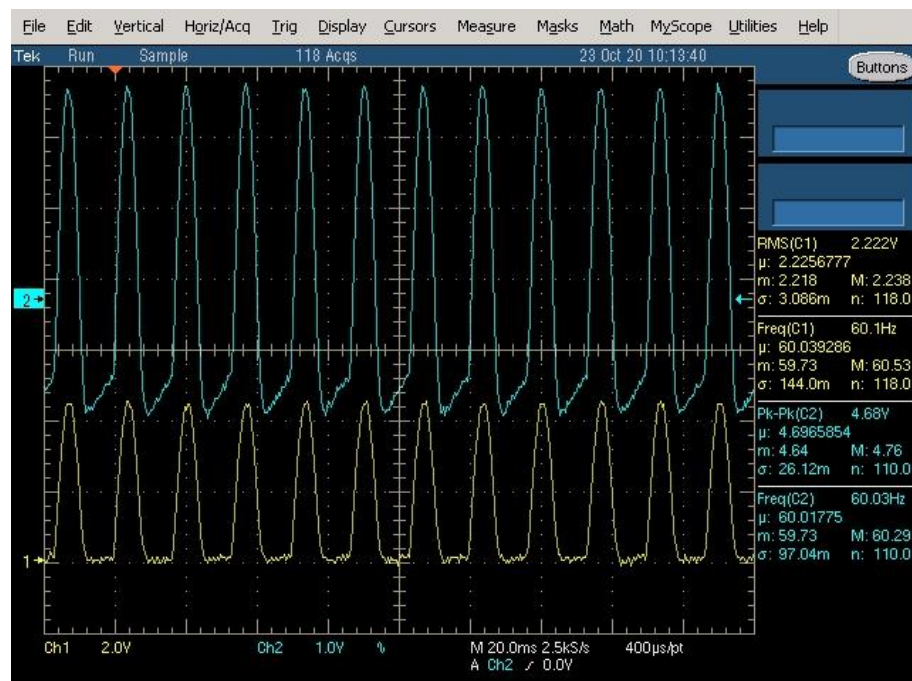


Figura 41: Forma de onda do arranjo H.  
Fonte: Autores (2020)

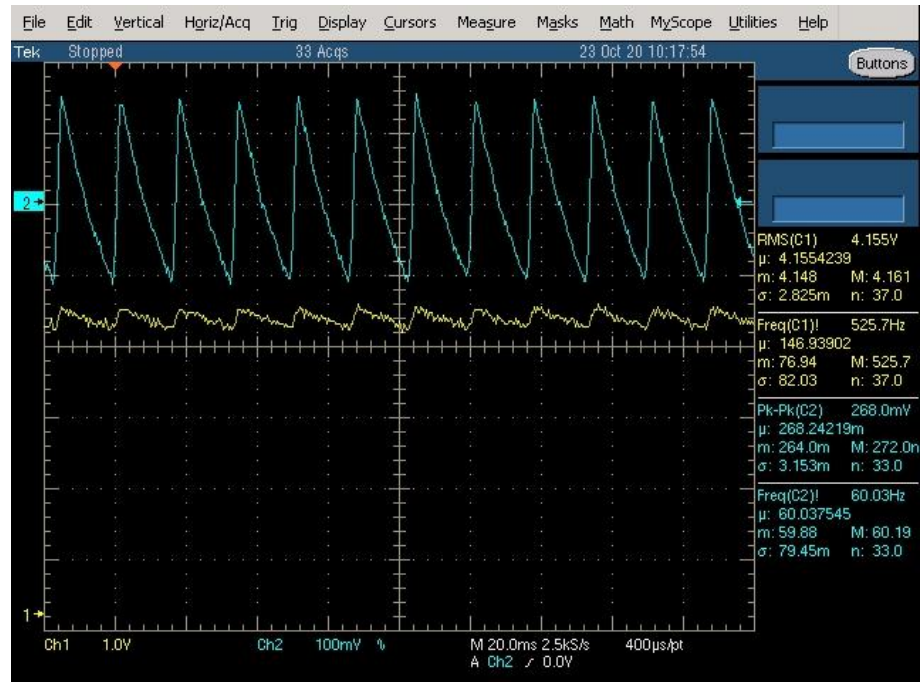


Figura 42: Forma de onda do arranjo I.  
Fonte: Autores (2020)

As formas de onda acima são as mais relevantes, ou seja, exibindo maiores diferenças gráficas. As demais encontram-se no apêndice 2.

## 7. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em amplitudes elevadas a fonte CC mais eficiente é obtida através das fontes de alimentação, onde o sinal passa por um processo de retificação, convertendo a tensão senoidal em tensão contínua. Porém, pelo processo não ser ideal, encontra-se uma ondulação indesejável na tensão fornecida pela fonte, conhecida como *ripple*. Esse fenômeno compromete a qualidade da alta tensão em corrente contínua, podendo resultar em medições imprecisas. Para minimizar esse problema, faz-se necessário o controle dessa ondulação, de forma que a mesma não ultrapasse as exigências estabelecidas pela norma IEC 60060-1 [1]

Focado nessa problemática, esse trabalho visou analisar e comparar as formas de onda e o fator de ondulação de diversos arranjos, com o propósito de estabelecer quais sistemas são mais adequados para medir ATCC e encontrar a menor ondulação residual. Mediante aos conceitos teóricos apresentados dentro dos capítulos 2 a 5, foram exibidos e detalhados todos os fatores relevantes para um melhor entendimento dos resultados obtidos no capítulo 6.

Analisando os resultados encontrados, pode-se concluir que o capacitor se mostrou fundamental na diminuição da ondulação residual, pois consegue filtrar o sinal de entrada. No entanto, outros fatores devem ser considerados.

A variação de *ripple* também é influenciada pela carga e fonte utilizada no circuito, de maneira que a carga altera a impedância, enquanto a fonte influencia devido as suas características internas.

Comparando os resultados encontrados nas tabelas 3 e 4, nota-se que a fonte CC se mostrou eficiente em todos os arranjos, pois os fatores de *ripple* permaneceram abaixo de 3 % conforme exige a norma IEC 60060-1, isso ocorre devido a sua filtragem interna que entrega um *ripple* controlado. Enquanto a fonte CA se mostrou eficiente em apenas dois arranjos (K e M), pois utiliza um retificador de meia onda que reduz a frequência em 50% aumentando a reatância, além de necessitar de uma filtragem externa. Vale ressaltar que apenas o capacitor do retificador de meia onda não é suficiente para que o *ripple* fique dentro dos 3 %, sendo necessário a inserção de capacitância.

Para realizar as medições de alta tensão em corrente contínua, foram utilizados divisores puramente resistivos e universal. Pode-se atestar que o sistema que apresenta o menor fator de ripple foi utilizando o divisor resistivo puro de 14,93 M $\Omega$

em paralelo com o capacitor de 1,2  $\mu\text{F}$ , alimentados pela fonte CC. Pois com esse capacitor a reatância encontrada foi de aproximadamente 200  $\Omega$  nas frequências de 120 Hz, forçando a corrente a passar pelo sistema de filtragem. Se porventura não for possível a utilização do capacitor e/ou divisor resistivo por razões de disponibilidade, é recomendado utilizar o divisor universal, pois o mesmo obteve o segundo menor fator de *ripple* devido a sua reatância de 2,62 M $\Omega$  estar em paralelo com a resistência de 225 M $\Omega$ . Caso a fonte CC não esteja disponível, a fonte CA só poderá ser utilizada caso possa dispor do capacitor de 1,2  $\mu\text{F}$  ou do divisor universal para que fique dentro das exigências da norma IEC 60060-1.

Para trabalhos futuros, indica-se:

- O estudo comparativo em medições ATCC fora do ambiente controlado, ou seja, sofrendo influências externas, como por exemplo, temperatura e umidade.
- Análise da interferência das capacitâncias parasitas em medições de ATCC.
- A implementação de um instrumento virtual que facilite a análise da ondulação residual.
- A avaliação dos efeitos da amplitude da ondulação na calibração de padrões de alta tensão em corrente contínua.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio**. Apresentação: ABNT NBR IEC60060-1. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Parte 2: Sistemas de Medição**. Apresentação: ABNT NBR IEC60060-2. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [3] ARINOS, J. T. J. **Divisor resistivo para ensaios de frente de onda em isoladores**. 1994. 149p. Dissertação (Mestrado) – Física, Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- [4] KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering - FUNDAMENTALS**. 2 ed. OXFORD - NEWNES, 2000
- [5] SILVA, M. T. F. **Projeto e desenvolvimento de padrão para alta tensão em corrente contínua na faixa de 1 kV a 50 kV**. 2011. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011
- [6] VIDAL, M. L. C. **Projeto, desenvolvimento e validação de um divisor de tensão de referência para alta tensão em corrente alternada (160 kV)**. Volta Redonda, 2018. 84p. Monografia (Graduação) - Engenharia Elétrica, Centro Universitário de Volta Redonda.
- [7] OLIVEIRA, Y. R. **Desenvolvimento de algoritmos para estimativa de parâmetros de ensaios em alta tensão em corrente alternada e contínua de acordo com a norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013**. 2017. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017
- [8] CAGIDO, M. C. **Impulso Atmosférico em Laboratório-Aplicação, Medição e Interpretação**. 2014. Monografia (TCC) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- [9] FERREIRA, L. S. **Novo método para estimativa de parâmetros de impulsos atmosféricos cortados na cauda**. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Equipamentos de alta tensão parte 102: Seccionadores e chaves de aterramento**. Apresentação: ABNT NBR IEC 62271-102:2006. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

[11] ALVES, F. D. **Divisor de tensão resistivo de baixa impedância para ensaios com impulsos atmosféricos até 500 kV**. Volta Redonda, 2017. 65p. Monografia (Graduação) - Engenharia Elétrica, Centro Universitário de Volta Redonda.

[12] PESENTE, J. R. **Fundamentos de técnicas de alta tensão**. Universidade estadual do oeste paraná. Centro de engenharias e ciências exatas. Foz do Iguaçu, 2004, 135p.

[13] ALVES, F. D. **Avaliação dos efeitos da amplitude de ondulação (*ripple*) na calibração de padrões de alta tensão em corrente contínua**. 2020. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020

[14] EMBARCADOS. Disponível em <https://www.embarcados.com.br/aprenda-a-analisar-o-ripple-da-sua-fonte/>. Acesso em 11 de setembro de 2020.

[15] FAZANO. Circuito retificador. Disponível em <http://www.fazano.pro.br/port44.html>. Acesso em 11 de setembro de 2020.

[16] ELETRONPI. Disponível em <http://www.eletronpi.com.br/ce-035-retificador-meia-onda.aspx>. Acesso em 15 de setembro de 2020.

[17] WIKIPEDIA. Disponível em [https://pt.wikipedia.org/wiki/Fonte\\_de\\_alimenta%C3%A7%C3%A3o](https://pt.wikipedia.org/wiki/Fonte_de_alimenta%C3%A7%C3%A3o). Acesso em 24 de setembro de 2020.

[18] BRAGA, Newton. **Filtragem e Ripple**. Disponível em <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/5389>. Acesso em 24 de setembro de 2020.

## APÊNDICE 1

Nesse apêndice serão mostrados todos os arranjos montados em laboratório citados no capítulo 6.

Arranjo A



Figura 43: Arranjo A

### Arranjo B



Figura 44: Arranjo B

### Arranjo C



Figura 45: Arranjo C

Arranjo D



Figura 46: Arranjo D

Arranjo E



Figura 47: Arranjo E

Arranjo F



Figura 48: Arranjo F

Arranjo G



Figura 49: Arranjo G

Arranjo H



Figura 50: Arranjo H

Arranjo I



Figura 51: Arranjo I

Arranjo J



Figura 52: Arranjo J

Arranjo K



Figura 53: Arranjo K

Arranjo L



Figura 54: Arranjo L

Arranjo M



Figura 55: Arranjo M

## APÊNDICE 2

Nesse apêndice serão exibidas as demais formas de onda não citadas no capítulo 6.

### Forma de onda do arranjo D

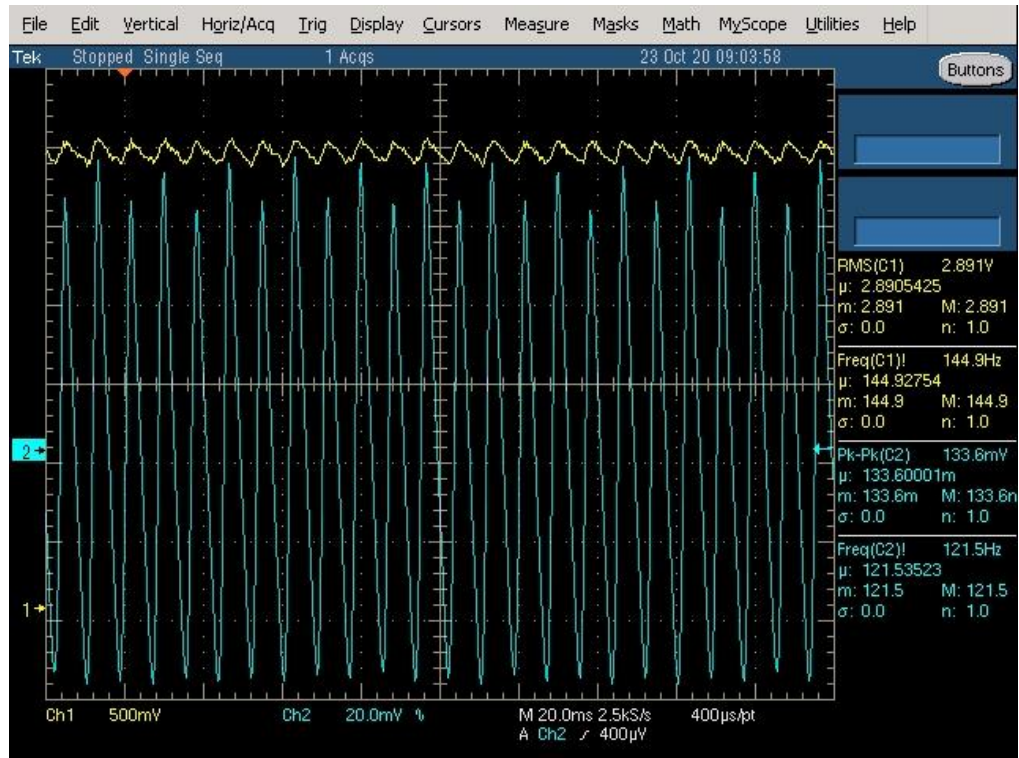


Figura 56: Forma de onda do arranjo D

### Forma de onda do arranjo E

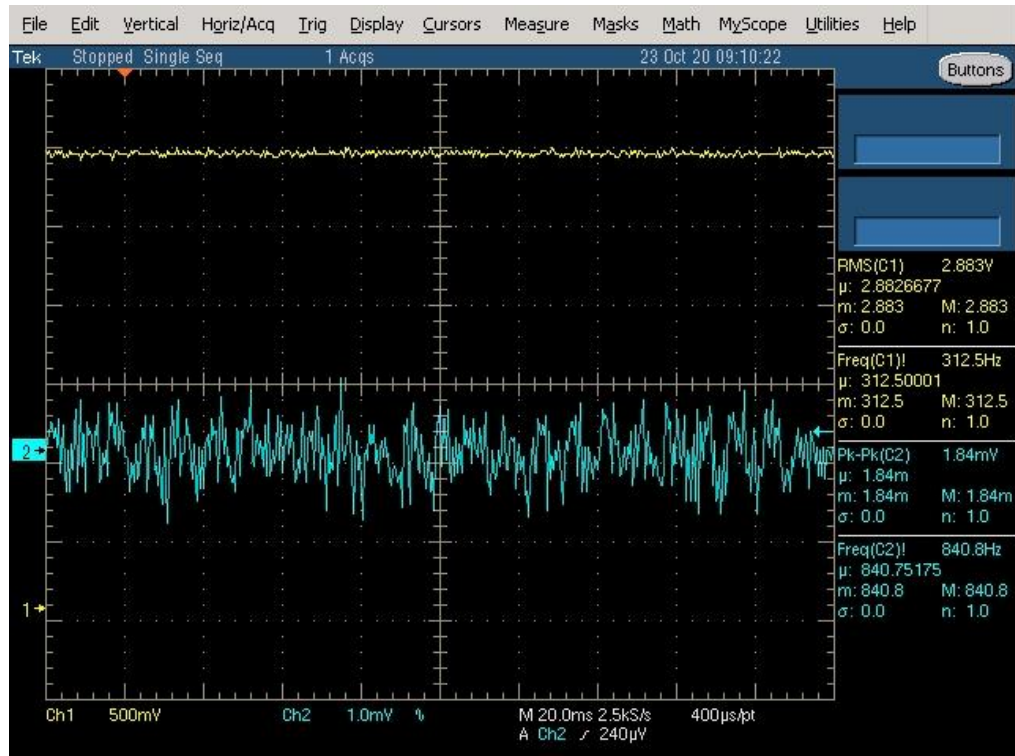


Figura 57 Forma de onda do arranjo E

### Forma de onda do arranjo F

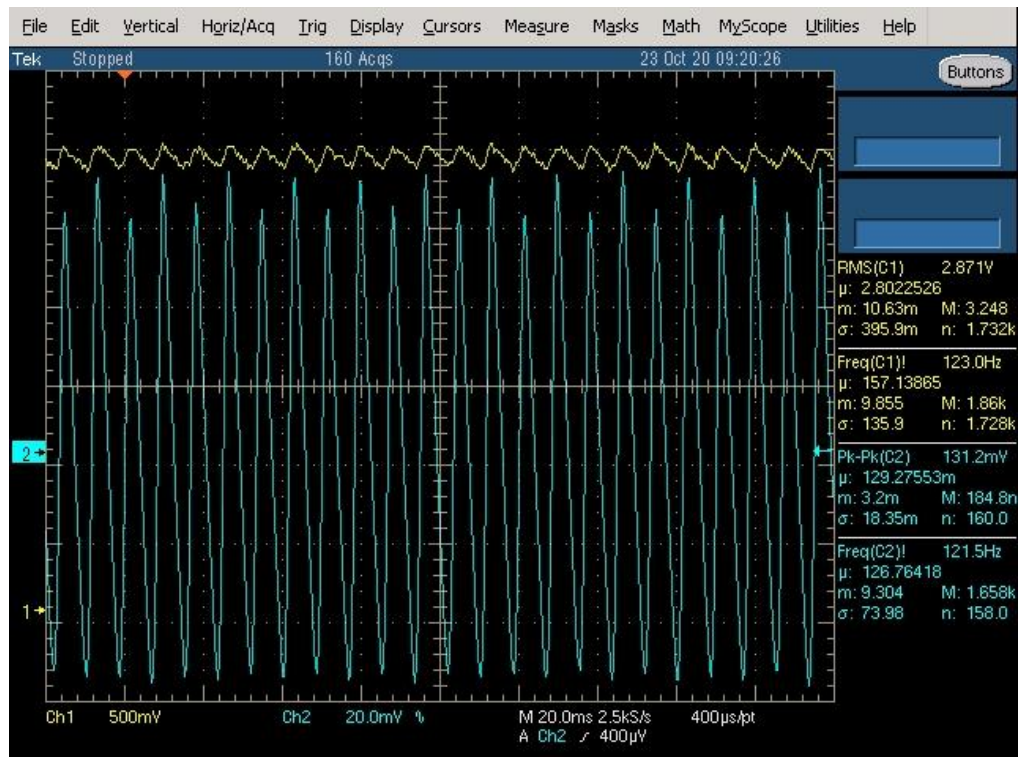


Figura 58: Forma de onda do arranjo F

### Forma de onda do arranjo J

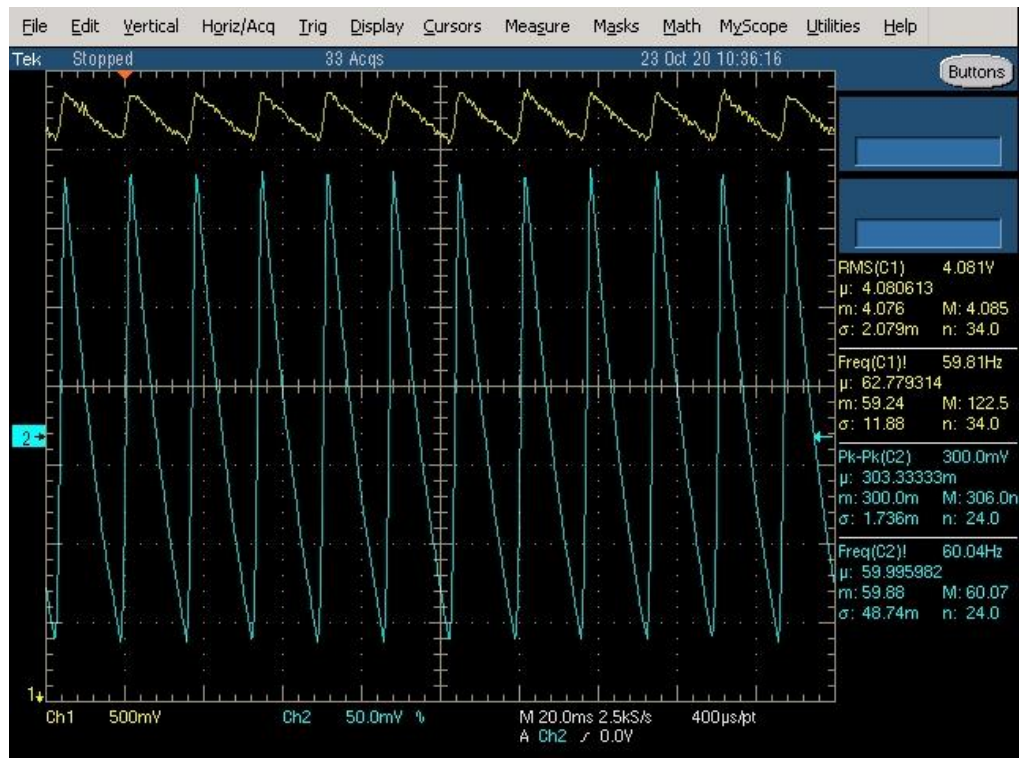


Figura 59: Forma de onda do arranjo J

### Forma de onda do arranjo K

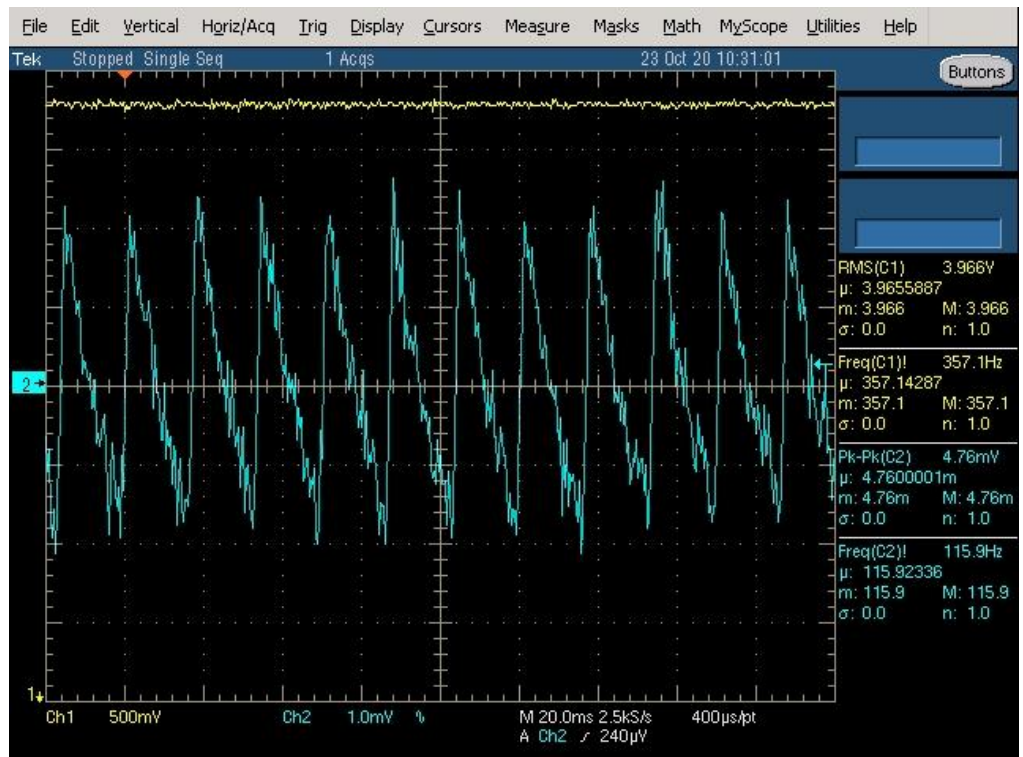


Figura 60: Forma de onda do arranjo K

### Forma de onda do arranjo L

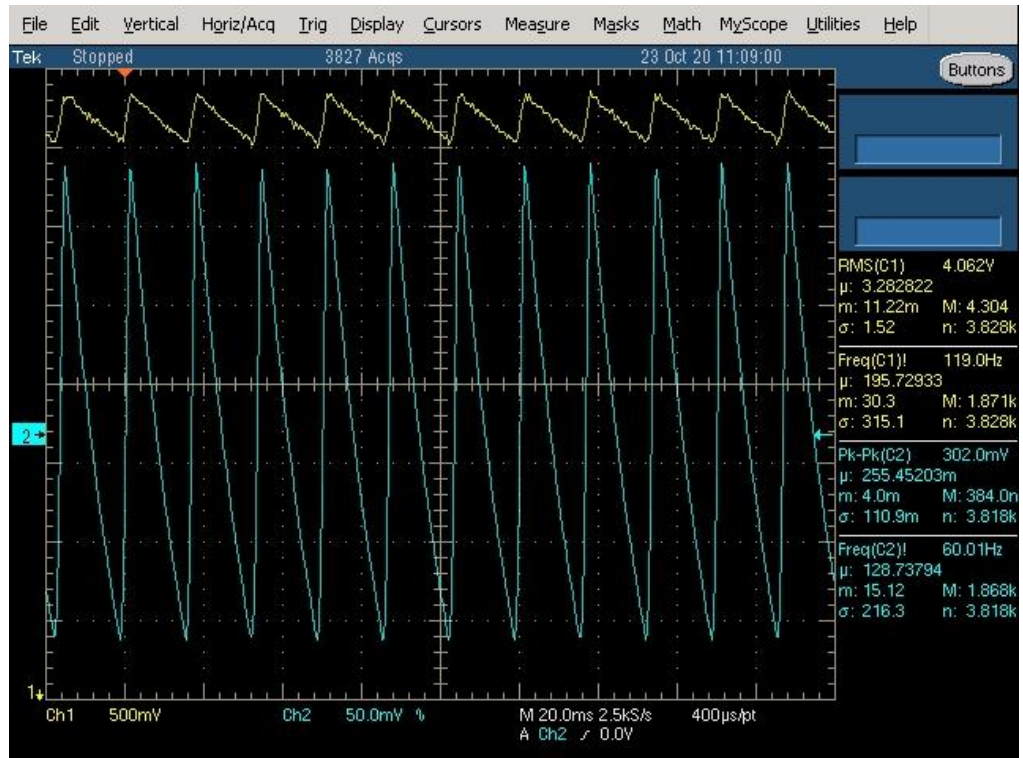


Figura 61: Forma de onda do arranjo L

### Forma de onda do arranjo M

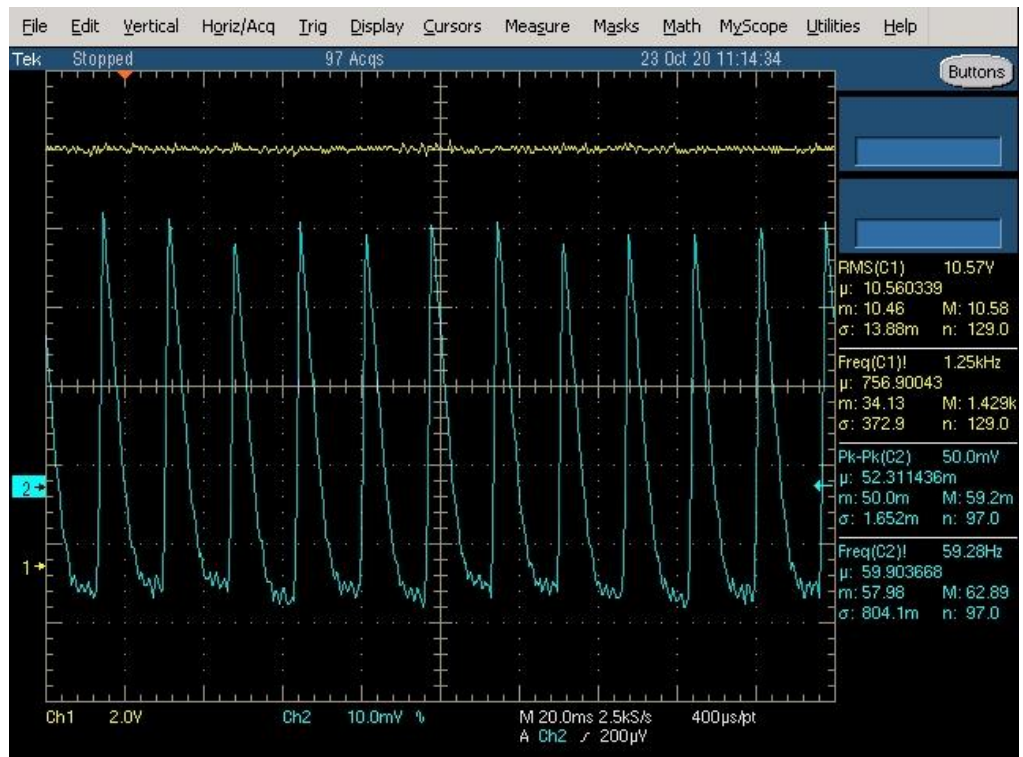


Figura 62: Forma de onda do arranjo M