

Sumário

Introdução	5
Filtros em fontes de alimentação	6
O capacitor como elemento de filtragem	7
Tensão de ondulação	10
Fatores que influenciam a ondulação	12
Tensão de saída no retificador com filtro capacitivo	14
Observação da ondulação com osciloscópio	16
Especificação do filtro capacitivo	18
Filtro capacitivo ideal	19
Apêndice	20
Questionário	20
Bibliografia	20



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Os circuitos retificadores de meia onda e onda completa fornecem uma tensão de saída consistindo em uma série de pulsos de mesmo sinal produzindo, assim, um fluxo de corrente unidirecional através da carga. No entanto, muitos equipamentos de corrente contínua necessitam de uma alimentação cuja variação no tempo seja tão pequena quanto possível. Para eliminar essa limitação, adiciona-se um filtro na saída do circuito retificador comum, como forma de minimizar as variações no tempo dos níveis da tensão e da corrente de saída.

Este fascículo tratará das técnicas normalmente empregadas na obtenção da filtragem do processo de retificação, com o objetivo de capacitar o leitor a empregar essas técnicas na construção de fontes com um maior grau de pureza na saída.



Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- * Armazenamento de energia em capacitores.
- * Retificação de meia onda.
- * Retificação de onda completa.

Filtros em fontes de alimentação

A tensão contínua pura se caracteriza por ter uma única polaridade e por um valor que não varia ao longo do tempo, como mostrado no gráfico da **Fig.1**.

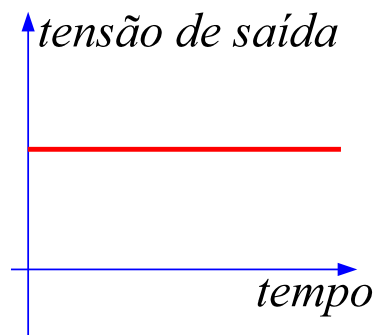


Fig.1 Tensão puramente contínua como função do tempo.

A tensão de saída produzida pelos circuitos retificadores, tanto de meia onda como de onda completa, toma a forma de uma série de pulsos. A **Fig.2** mostra esse tipo de tensão de saída para o caso do retificador de onda completa. Como pode ser aí observado, embora os pulsos de tensão sejam de mesma polaridade, existe uma variação no tempo do valor da tensão de saída.

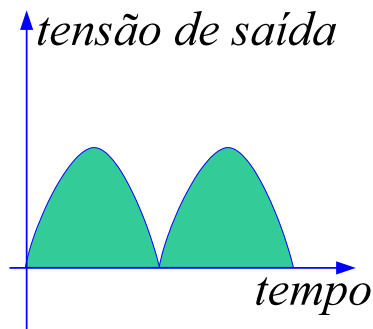


Fig.2 Dependência no tempo da tensão de saída de um retificador de onda completa.

Salvo em algumas situações, como por exemplo na saída dos carregadores de bateria convencionais, a tensão pulsada fornecida pelos circuitos retificadores comuns não é apropriada para uso em circuitos mais sofisticados cuja operação demanda um alto grau de pureza na tensão contínua de alimentação.

Essa deficiência presente no retificador comum é resolvida pelo emprego de um filtro conectado entre a saída do retificador e a carga, conforme ilustrado na **Fig.3**. O filtro atua no sentido de aproximar a tensão na carga, tanto quanto possível, da tensão contínua ideal, de valor constante como mostrado no gráfico da **Fig.1**.

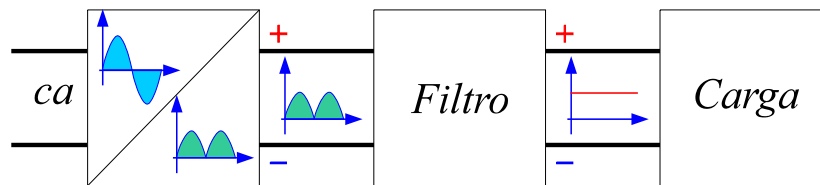


Fig.3 Diagrama de blocos de um circuito retificador com filtro na saída.

O CAPACITOR COMO ELEMENTO DE FILTRAGEM

A capacidade de armazenamento de energia elétrica dos capacitores pode ser utilizada como recurso para realizar um processo de filtragem na tensão de saída de um circuito retificador. Essa filtragem é realizada conectando-se o capacitor diretamente nos terminais de saída do circuito retificador, como mostrado nos dois diagramas da **Fig.4**.

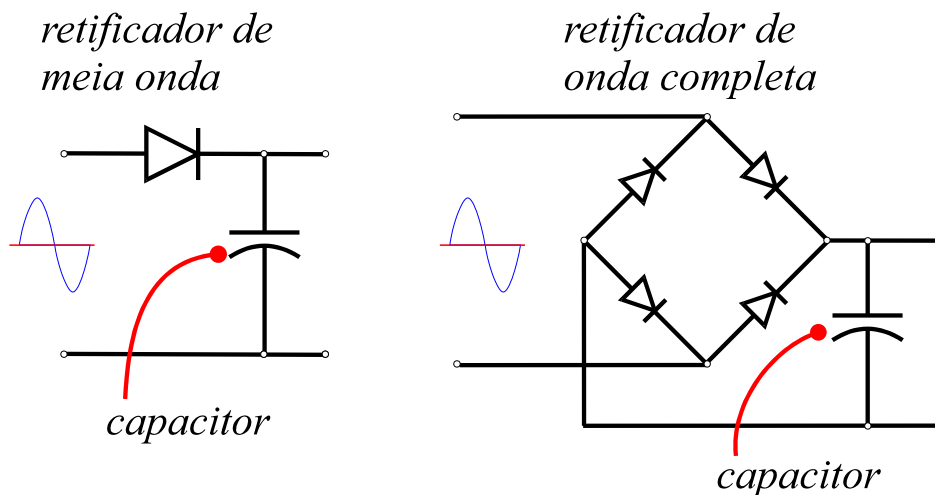


Fig.4 Circuitos retificadores de meia onda e onda completa com capacitor de saída.

Considere, por exemplo, a operação do retificador de meia onda com capacitor de saída. Nos intervalos de tempo em que o diodo entra em regime de condução, uma parte da corrente flui através da carga com a parte restante fluindo para o capacitor, como mostrado na **Fig.5**.

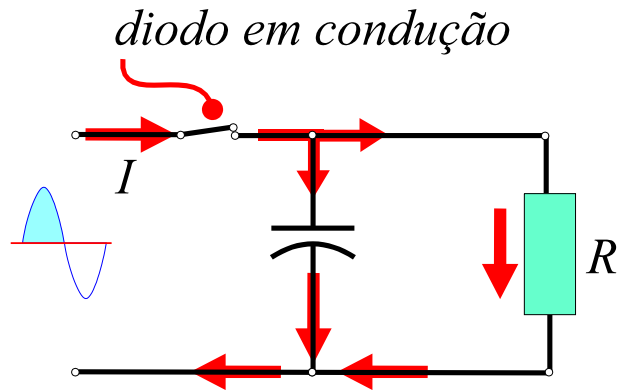


Fig.5 Operação do retificador de meia onda com capacitor de saída durante o regime de condução.

Nesses intervalos de tempo, carga elétrica é transferida da armadura conectada ao cátodo do diodo para a segunda armadura do capacitor.

Nos intervalos de tempo em que o diodo opera no regime de bloqueio, o capacitor inicia o processo de transferência da carga elétrica da armadura negativa para a positiva. Com o circuito retificador em bloqueio, não é possível a ocorrência de um fluxo de corrente através do circuito retificador. Conseqüentemente, a corrente produzida pela descarga do capacitor flui através do resistor de carga, conforme ilustrado na **Fig.6**.

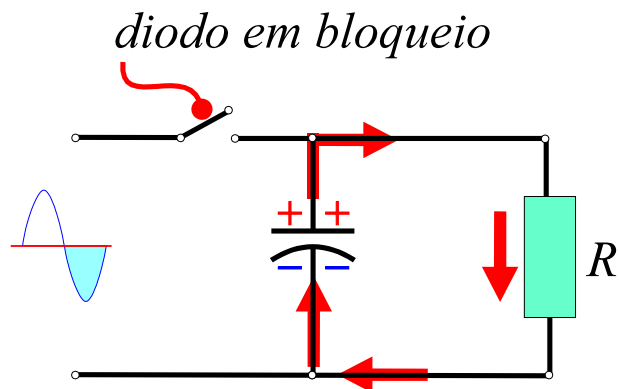


Fig.6 Operação do retificador de meia onda com capacitor de saída durante o regime de bloqueio.

Por estar em paralelo com o capacitor, o resistor de carga fica sempre submetido à mesma diferença de potencial existente entre as armaduras do capacitor. À medida que ocorre a descarga do capacitor, a diferença de potencial entre as armaduras diminui, como mostrado na **Fig.7**.

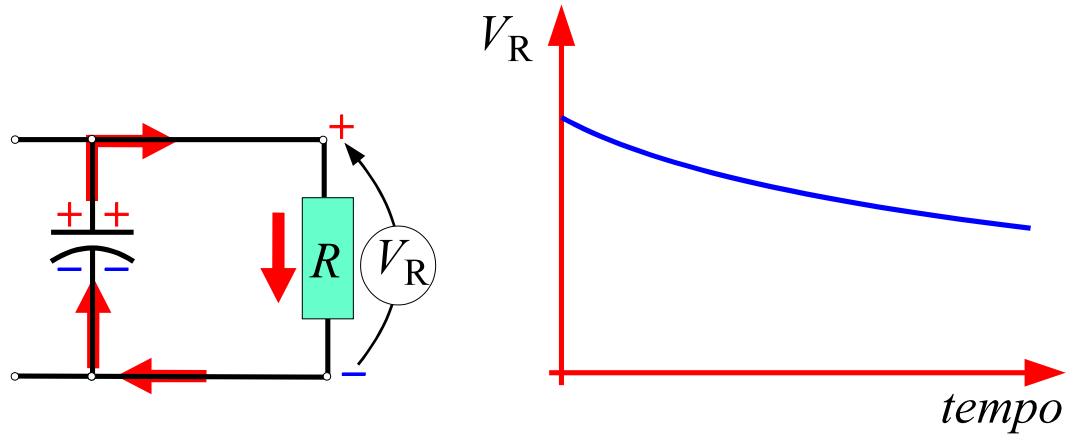


Fig.7 Tensão de saída do circuito retificador durante o processo de descarga do capacitor.

Esse processo de descarga continua até o momento em que a tensão na entrada atinge um valor V_1 suficiente para colocar o diodo novamente no regime de condução, como mostrado na **Fig.8**. Este valor V_1 é exatamente igual à tensão no capacitor após um certo intervalo de tempo de descarga. A partir desse instante de tempo, o ânodo do diodo torna-se positivo em relação ao cátodo, e a carga elétrica armazenada na armadura positiva do capacitor começa novamente a aumentar.

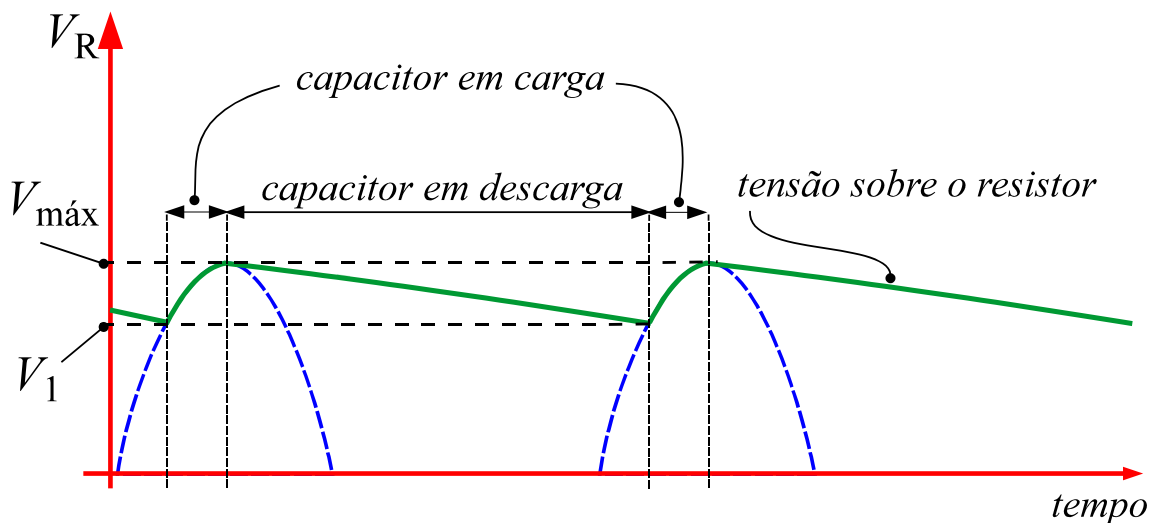


Fig.8 Gráfico da tensão de saída do retificador de meia onda com filtro capacitivo.

Observando-se o gráfico da **Fig.8**, nota-se que o diodo permanece em condução até o instante em que a tensão de entrada atinge o valor máximo $V_{\text{máx}}$. Dessa forma, a colocação do capacitor permite que a tensão de saída, embora variável, permaneça sempre próxima ao valor máximo $V_{\text{máx}}$, obtendo-se efetivamente um aumento no valor médio da tensão de saída.

O aumento no valor médio da tensão no resistor de carga pode ser observado comparando-se os gráficos das tensões de saída do circuito retificador com e sem filtro capacitivo, conforme ilustrado na **Fig.9**.

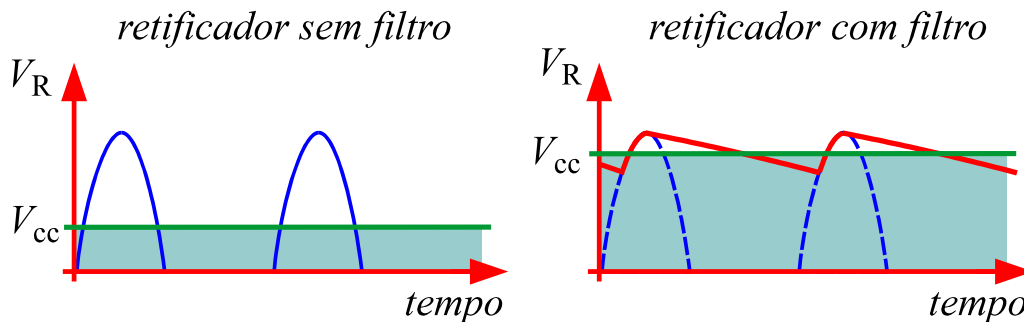


Fig.9 Comparação das tensões de saída do circuito retificador de meia onda com e sem filtro capacitivo.

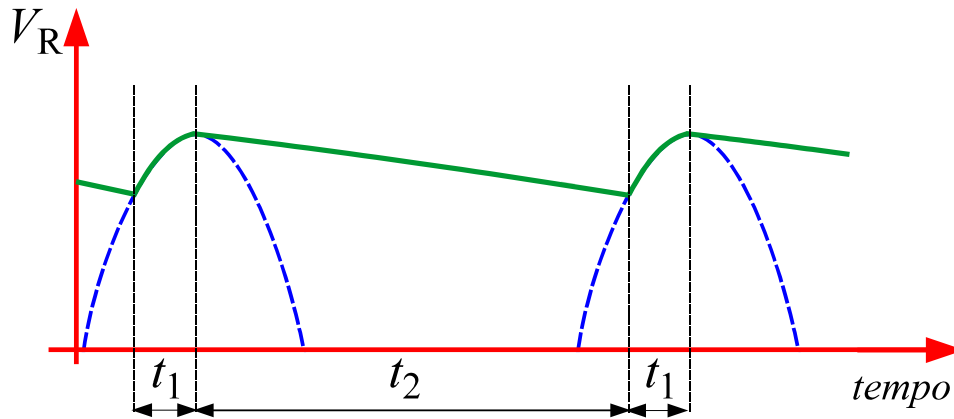


A colocação de um capacitor na saída de um circuito retificador aumenta o valor da tensão média na carga.

TENSÃO DE ONDULAÇÃO

O capacitor na saída do circuito retificador sofre sucessivos processos de carga e descarga. Nos períodos de condução do diodo o capacitor sofre carga e sua tensão aumenta, enquanto nos períodos de bloqueio o capacitor descarrega e sua tensão diminui.

Os intervalos de tempo t_1 e t_2 indicados na **Fig.10** definem as durações dos processos de carga e descarga, respectivamente.



t_1 = intervalo de tempo do processo de carga do capacitor.

t_2 = intervalo de tempo do processo de descarga do capacitor.

Fig.10 Definição dos tempos de carga e descarga do capacitor.

Como se pode observar no gráfico da **Fig.11**, a tensão de saída não assume o valor constante característico de uma tensão puramente contínua, variando no tempo entre os valores extremos V_1 e $V_{\text{máx}}$. Essa variação na tensão de saída é denominada de **ondulação**, termo derivado do inglês *ripple*.

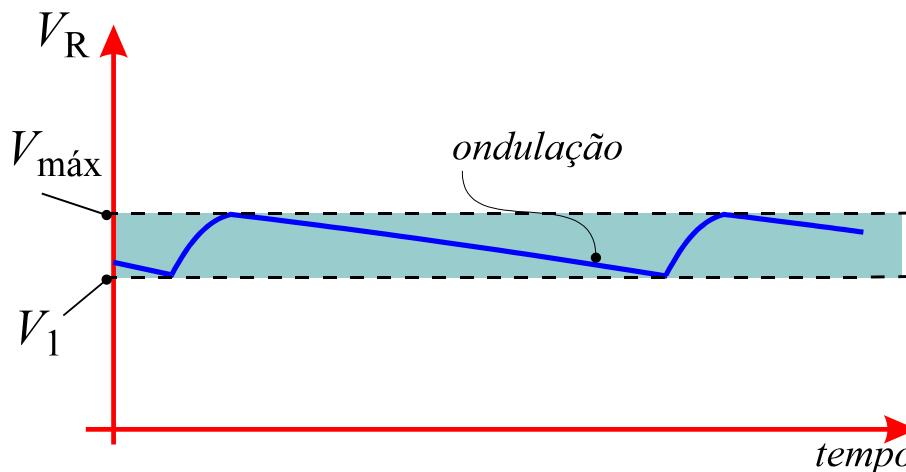



Fig.11 Ondulação na tensão de saída do circuito retificador de meia onda com filtro capacitivo.

 **Ondulação ou ripple, é a variação observada na tensão de saída do circuito retificador com filtro capacitivo.**

A diferença entre os valores $V_{\text{máx}}$ e V_1 é definida como a **tensão de ondulação** V_{ond} . Este parâmetro, definido no gráfico da **Fig.12**, assume a expressão matemática,

$$V_{\text{ond}} = V_{\text{máx}} - V_1 \quad (1)$$

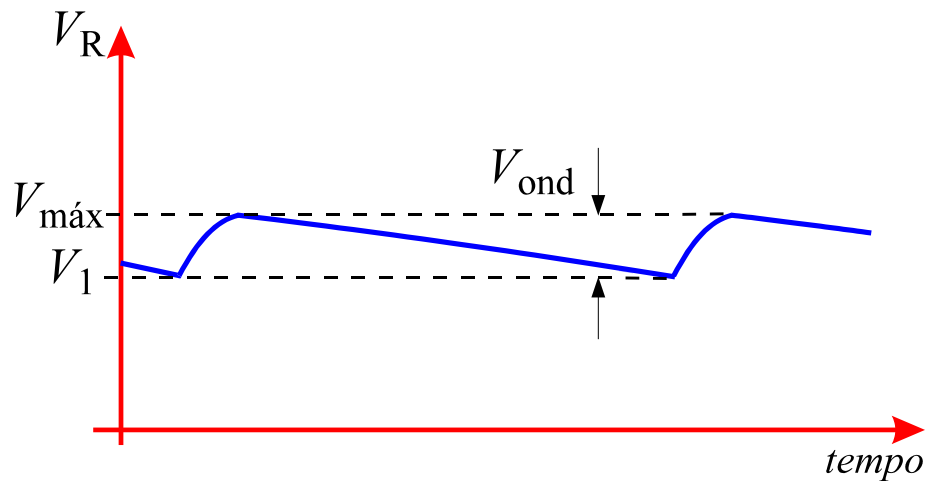


Fig.12 Tensão de ondulação na saída do retificador de meia onda com filtro capacitivo.

A tensão de ondulação de uma fonte retificada é uma medida da **componente alternada** presente na saída da fonte. O valor dessa componente alternada serve como parâmetro de avaliação da qualidade de um circuito retificador.



Quanto menor o valor da componente alternada presente na saída de uma fonte retificadora melhor é sua qualidade.

FATORES QUE INFLUENCIAM A ONDULAÇÃO

A ondulação na saída de um circuito retificador depende fundamentalmente dos três fatores descritos a seguir.

Capacidade de armazenamento do capacitor

A capacidade de armazenamento de um capacitor é proporcional ao valor de sua capacitância. Fixado o valor da resistência de carga, um maior valor da capacitância implica um processo de descarga mais lento e, conseqüentemente, uma menor tensão de ondulação.

Resistência de carga

Quanto maior for o valor da resistência de carga, menor será a corrente suprida pelo capacitor durante o processo de descarga. Dessa forma, a carga elétrica armazenada na armadura positiva do capacitor diminui mais lentamente na descarga, resultando em uma menor tensão de ondulação.

Tipo de circuito retificador

Fixados os valores da resistência de carga e da capacitância do circuito retificador, a tensão de ondulação fica dependente apenas do tipo de circuito retificador. Como mostrado na **Fig.13**, no circuito retificador de onda completa o capacitor é carregado duas vezes a cada ciclo da tensão de entrada. Esse tipo de circuito opera, portanto, com a metade do tempo do retificador de meia onda, exibindo assim uma menor tensão de ondulação.

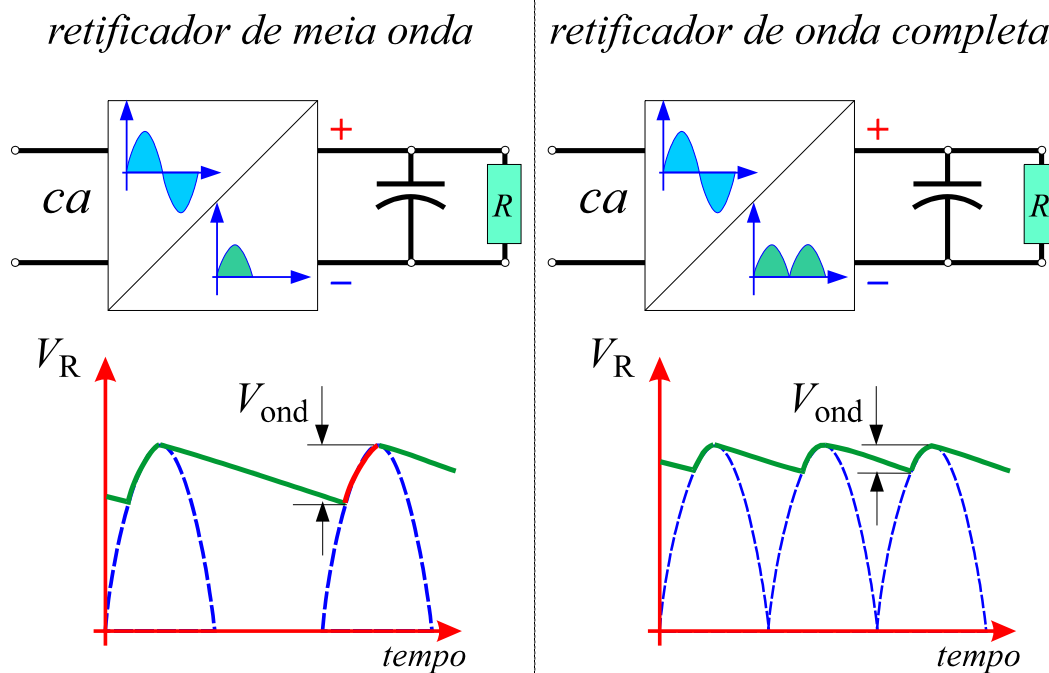


Fig.13 Gráficos das tensões no capacitor de saída dos retificadores de onda completa e de meia onda.

TENSÃO DE SAÍDA NO RETIFICADOR COM FILTRO CAPACITIVO

A tensão média V_{cc} no capacitor de saída de um circuito retificador de onda completa ou de meia onda pode ser calculada a partir da expressão

$$V_{cc} = V_{m\acute{a}x} - \frac{V_{ond}}{2} \quad (2)$$

onde $V_{m\acute{a}x}$ é o valor máximo da tensão de entrada, que é relacionada ao valor V_{ca} por

$$V_{cc} = \sqrt{2} V_{ca} \quad (3)$$

e V_{ond} é a tensão de ondulação já definida anteriormente.

Na ausência de um resistor de carga, ou equivalentemente com a saída em aberto, o capacitor nunca descarrega. Nessas condições, $V_{ond} = 0$ e da **Eq.(2)**, tem-se que

$$V_{cc} = V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2} V_{ca}$$

A tensão de saída nesse caso assume a forma mostrada no gráfico da **Fig.14**, tanto para o retificador de onda completa quanto para o de meia onda.

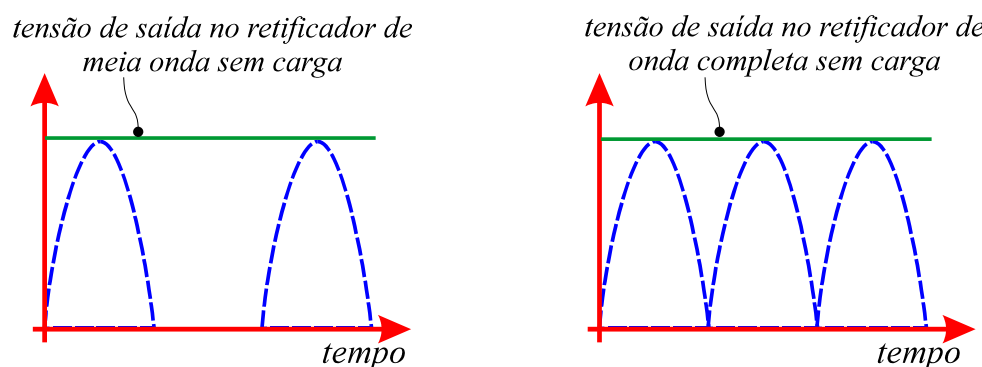


Fig.14 Tensões de saída dos retificadores de onda completa e meia onda, na ausência de carga.



Na ausência de um resistor de carga, as tensões de saída dos circuitos retificadores de meia onda e de onda completa com filtro capacitivo não variam no tempo.

O exemplo seguinte ilustra o comportamento da tensão de saída de um circuito retificador de meia onda com filtro como função do resistor de carga.

Exemplo 1: Analisar o comportamento de um circuito retificador de meia onda: (a) Na ausência de um resistor de carga e (b) na presença de um resistor de carga que provoque uma tensão de ondulação de 3V.

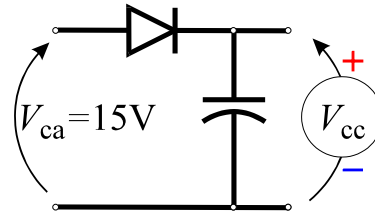


Fig.15 Circuito retificador para o Exemplo 1.

Com base na **Fig.15**, na ausência de um resistor de carga, a tensão de saída é constante, sendo dada por

$$V_{cc} = \sqrt{2} V_{ca}$$

Com $V_{ca} = 15 \text{ V}$ obtém-se,

$$V_{cc} = \sqrt{2} \times 15 = 21,2 \text{ V}$$

Esse comportamento pode ser observado conectando-se um osciloscópio em modo *dc* na saída da fonte retificadora. A forma de onda observada seria constante conforme mostrado na **Fig.16**.

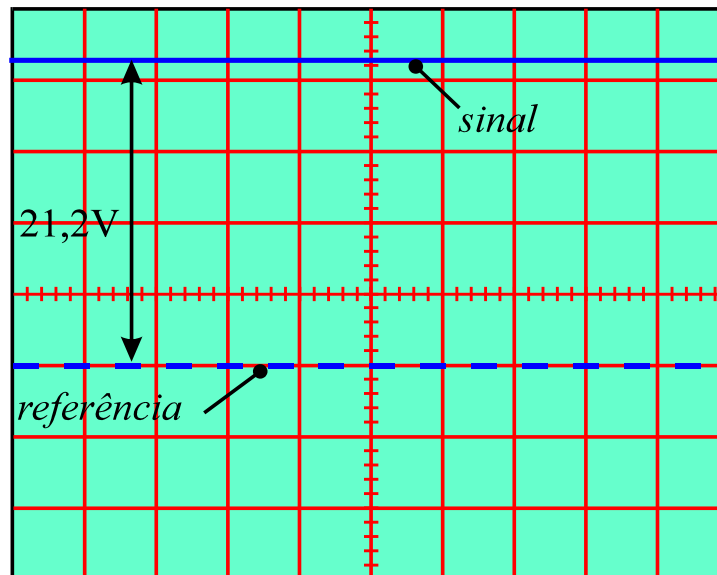


Fig.16 Forma de onda de saída para o circuito retificador da **Fig.15**.

(b) Com um resistor na saída, conforme mostrado na **Fig.17**, aparece uma ondulação na tensão de saída. Admitindo-se que a tensão de ondulação seja $V_{\text{ond}} = 3 \text{ V}$, o uso da **Eq.(2)** fornece

$$V_{\text{cc}} = 15 \times \sqrt{2} - \frac{3}{2} = 21,2 - 1,5$$

$$\Rightarrow V_{\text{cc}} = 19,7 \text{ V}$$

A tensão *cc* na saída diminui portanto de 1,5 V devido à presença do resistor de carga.

A forma de onda da saída, observada na tela do osciloscópio, operando em modo *dc*, seria aquela mostrada na **Fig.18**.

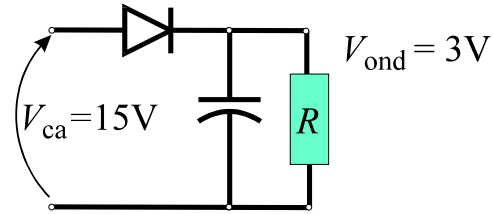


Fig.17 Circuito retificador conectado a uma carga.

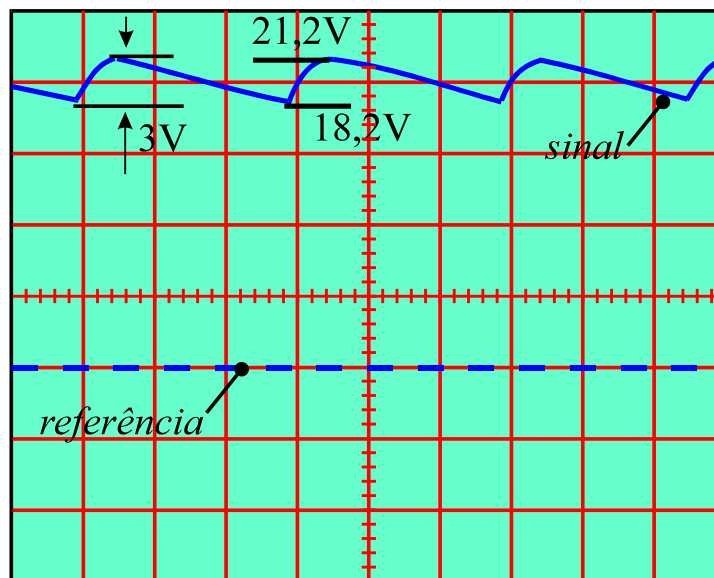


Fig.18 Forma de onda de saída para o circuito retificador da **Fig.17**.

OBSERVAÇÃO DA ONDULAÇÃO COM OSCILOSCÓPIO

A ondulação é uma componente alternada presente na tensão de saída de uma fonte retificadora com filtro capacitivo conectado a um resistor de carga. Em situações de interesse prático, o valor da tensão de ondulação é normalmente inferior a 10% do valor V_{cc} . Com esse valor reduzido, torna-se difícil a medição precisa da tensão de ondulação por intermédio de um osciloscópio que esteja operando em modo *dc*.

Para obter uma medida precisa do parâmetro V_{ond} , deve-se utilizar o osciloscópio no modo *ac*, pois elimina-se a componente *cc* na saída da fonte retificadora, possibilitando que apenas a componente alternada seja visualizada na tela do osciloscópio.

A **Fig.19** ilustra o que se observa na tela de um osciloscópio conectado à saída de uma fonte retificadora com filtro capacitivo operando nos modos *dc* e *ac*. Note-se que para operação no modo *ac*, o ganho vertical pode ser aumentado de forma a permitir uma caracterização precisa da ondulação da fonte retificadora.

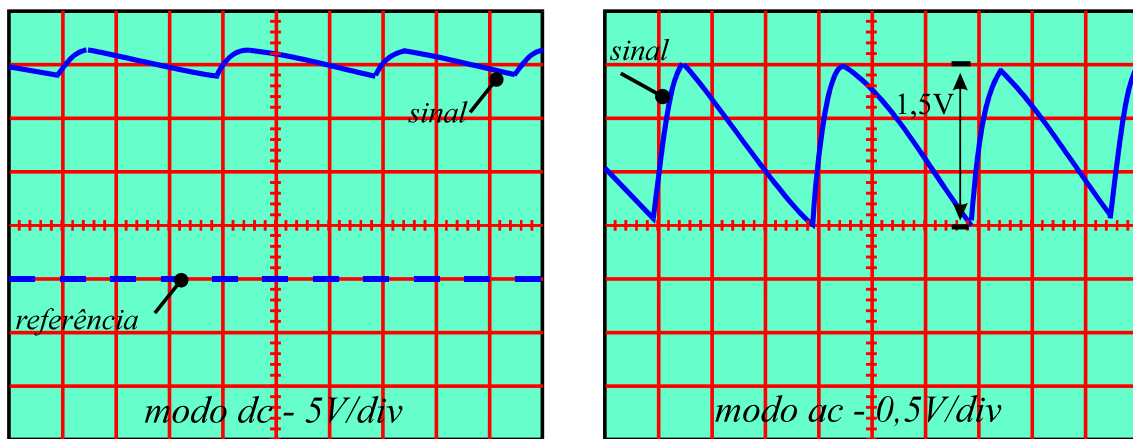


Fig.19 Tensão no capacitor de saída de uma fonte retificadora observada na tela de um osciloscópio operando nos modos *dc* e *ac*.



Para medir com precisão o valor da tensão de ondulação no capacitor de saída de uma fonte retificadora, deve-se utilizar o modo de operação *ac* do osciloscópio.

ESPECIFICAÇÃO DO FILTRO CAPACITIVO

De acordo com a **Eq.(2)**, a tensão no capacitor de saída de uma fonte retificadora depende da tensão de ondulação. Esta, por sua vez, depende do tipo de circuito retificador, do valor da capacitância do filtro e do resistor de carga ou equivalentemente da corrente na carga. Essa dependência torna difícil a obtenção de uma expressão exata que possibilite a determinação da capacitância do filtro para operação em um valor V_{cc} pré-especificado.

Entretanto, devido à grande tolerância nos valores de capacitância dos capacitores eletrolíticos, que pode chegar a 50% do valor nominal, pode-se formular uma expressão simplificada para obtenção de um valor adequado da capacitância do filtro. Essa expressão pode ser utilizada no projeto do filtro capacitivo, sem introduzir erro significativo em situações em que a tensão de ondulação seja inferior a 20% do valor V_{cc} . Nessas condições, a capacitância do filtro pode ser obtida da expressão

$$C = T \frac{I_{\text{máx}}}{V_{\text{ond}}} \quad (4)$$

onde:

- V_{ond} = Tensão de ondulação medida em Volts
- $I_{\text{máx}}$ = Corrente máxima na carga em mA
- T = Período aproximado da descarga do capacitor
- C = Valor da capacitância do filtro em μF

Para uma frequência ac de 60 Hz utiliza-se :

- $T = 16,6$ ms para um retificador de meia onda
- $T = 8,33$ ms para um retificador de onda completa

A seguir são apresentados dois exemplos de dimensionamento do filtro capacitivo com o emprego da **Eq.(4)**.

Exemplo 2: Deseja-se montar uma fonte retificadora de meia onda com tensão de saída de 12V, corrente de 150mA, e com ondulação de 2V. Assumindo a frequência da rede elétrica de 60 Hz, determinar a capacitância.

Utilizando $T = 16,6$ ms, $I_{\text{máx}} = 150$ mA e $V_{\text{ond}} = 2$ V, o uso da **Eq.(4)** fornece

$$C = 16,6 \times \frac{150}{2} \Rightarrow C = 1245 \mu\text{F}$$

Exemplo 3: Repetir o **Exemplo 2** para o caso de um circuito de onda completa.

Neste caso, utiliza-se na **Eq.(4)** o valor $T = 8,33$ ms, que fornece

$$C = 8,33 \times \frac{150}{2} \Rightarrow C = 625 \mu\text{F}$$

Ao se projetar uma fonte retificadora, além do valor da capacitância do filtro, deve-se, também, especificar sua tensão de isolamento. A tensão de isolamento deve ser sempre superior ao maior valor da tensão de operação do capacitor.

FILTRO CAPACITIVO IDEAL

O filtro capacitivo ideal seria aquele que possibilitasse a obtenção de uma tensão de saída não ondulada. Certamente este tipo de capacitor deveria exibir uma capacidade de armazenamento de carga elétrica elevadíssima para poder manter a tensão de saída absolutamente constante. Nota-se, portanto, que a utilização prática de um filtro capacitivo que produza pequena ondulação na saída requer uma certa ponderação:



Diminuir o percentual de ondulação implica no uso de filtros de alta capacitância, que além de serem mais volumosos, aumentam o custo do projeto.

Na prática, os filtros capacitivos normalmente utilizados na construção de fontes retificadoras são do tipo eletrolítico, pois esse tipo de filtro apresenta um alto valor de capacitância por unidade de volume.

Vale também observar que, se a tensão de ondulação de uma fonte retificadora é elevada demais para alimentação de um determinado equipamento, utilizam-se normalmente circuitos eletrônicos destinados especificamente à regulação da tensão de alimentação, evitando, assim, a necessidade de alteração do filtro capacitivo.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual o objetivo de utilização de um filtro na saída de um retificador?
2. O que ocorre com a tensão média na carga quando se coloca um capacitor em paralelo com a saída de um retificador?
3. O que é ondulação?
4. Qual a relação entre ondulação e qualidade de uma fonte retificadora?
5. Que fatores influenciam a ondulação?
6. Qual a tensão média na saída de um retificador de meia onda, com filtro, submetido a uma tensão de entrada com $V_{\text{máx}} = 10 \text{ V}$ para uma tensão de ondulação de 1 V?
7. Que modo de operação deve ser utilizado em um osciloscópio para medição precisa da tensão de ondulação na saída de uma fonte retificadora com filtro?
8. Por que se utilizam capacitores eletrolíticos na construção de fontes retificadoras?

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Roberts & BRANDT, Hans. Retificadores semicondutores não controlados. São Paulo, E. P. U., 1975, 49pp. il. (Eletrônica Industrial, 1).

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos. 8.^a ed., São Paulo, Érica, 1984, 580pp. il.

SENAI/DN. Reparador de circuitos eletrônicos; Eletrônica Básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1979 (Coleção Básica SENAI, Módulo 1).

TRAINING PUBLICATIONS DIVISION OF PERSONEL PROGRAM SUPPORT ACTIVITY. Curso de eletrônica. São Paulo, Hemus, c1975, 178pp.

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. Eletrônica básica. 6.^a ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, c1974, v.6.