PSIM

SIMULADOR DE CONVERSORES ESTÁTICOS

1. INTRODUÇÃO

A simulação de circuitos está ficando cada vez mais aceita como uma ferramenta normal do projeto de equipamentos de eletrônica. Este material tem o objetivo de fazer uma breve introdução à utilização do simulador de circuitos elétricos PSIM. O uso da simulação é reconhecido como uma necessidade prática, tornando-se uma ferramenta indispensável na formação de técnicos e engenheiros, principalmente na parte referente a projetos e interpretação de equipamentos eletroeletrônicos.

O método prático para verificar o projeto de um circuito elétrico é construí-lo e testá-lo. No entanto, isso pode se tornar caro e consumir muito tempo. Como alternativa, o circuito pode ser cuidadosamente simulado usando um programa de computador antes da implementação do circuito real.

O PSIM é um programa de simulação especialmente projetado para eletrônica de potência. Com interface amigável, simulação rápida, e apresentação de formas de onda semelhante à tela de um osciloscópio, o PSIM mostra ser um ambiente de simulação poderoso para a análise de conversores de potência, malhas de controle e estudo de acionamento de motores. Além disso, o simulador pode perfeitamente ser utilizado em praticamente todos os tipos de circuitos, sejam eles digitais ou analógicos.

O PSIM é muito útil para simular quase todos os tipos de circuitos, cobrindo uma enorme faixa de aplicações. Um circuito é descrito por comandos armazenados em arquivo chamado de "arquivo de circuito", que é lido pelo simulador PSIM. Os comandos são fáceis de aprender e usar.

Os conceitos elétricos são gerais e úteis para todos os tamanhos de circuitos. O simulador não diferencia um circuito grande de um pequeno ou microvolts e megavolts, pois são apenas números para o PSIM. E mais, **o simulador não avalia como o circuito deveria se comportar**. Logo, **você deve analisar os resultados para ver se eles correspondem com a teoria**.

Para circuitos discretos (circuitos feitos de partes individuais montadas sobre um circuito), o PSIM tem uma variedade de usos, dos quais se destacam:

- Verificar uma idéia de circuito antes de montá-la em laboratório. Os resultados de simulação são livres de instabilidade de tensão e corrente, restrições de aterramento, e outros problemas de laboratório.
- Realização de testes ideais, que consiste na operação empregando componentes ideais para isolar efeitos limitantes no seu projeto.
- Realização de medidas dos testes simulados que são difíceis de serem realizadas na prática por serem:
    - Difíceis (devido a ruídos elétricos ou carga do circuito);
    - Inconvenientes (equipamento especial de teste não é disponível);
    - Imprudentes (o circuito de teste pode se destruir).
- Possibilidade de simular um circuito várias vezes com variações de componentes para verificar que percentual passaria no teste final, e determinar quais as combinações dão os resultados para o pior caso.
- Projeto de sistemas de controle de conversores estáticos em malha fechada (com sistema de controle), sem a necessidade de se projetar todo o circuito de controle.

Uma vez familiarizado com o PSIM, você achará que ele pode substituir a maioria de seus trabalhos de laboratório. Como qualquer nova ferramenta, um certo conhecimento é requerido para tirar o maior proveito.

O PSIM é disponibilizado, na forma de uma demonstração (com recursos limitados) no site: http://www.powersimtech.com/download.asp?file=demo/psim8.0.1_demo.zip

2. ESTRUTURA DO SIMULADOR

O simulador, uma vez instalado, apresenta dois programas executáveis: o PSIM, que é o editor de esquemas elétricos e o simulador de circuitos, e SIMVIEW, que demonstra graficamente as formas de onda obtidas na simulação. Os ícones dos programas estão representados na figura abaixo:

Figura 1 - Ícones dos programas

O simulador utiliza algumas extensões características para os arquivos gerados por ele, que são:

Extensão	Descrição	Tipo de arquivo
sch	Esquemas do PSIM	binário
cct	Lista de nós do esquema	texto
txt	Saída da simulação	texto
fra	Saída de uma análise AC	texto
smv	Lista de forma de ondas	binário

O programa é em inglês. Desta forma, todos os números devem ser digitados utilizando-se um ponto como separador decimal, ao invés da vírgula utilizada em português, ou seja, deve-se digitar 34.56 e não 34,56.

Para facilitar a digitação de números muito grandes ou muito pequenos, o PSIM aceita algumas letras indicando múltiplos e submúltiplos. Na tabela a seguir estão relacionados os sufixos aceitos.

Sufixo	Nome	Valor
p	pico	10^{-12}
n	nano	10^{-9}
u	micro	10^{-6}
m	mili	10^{-3}
K ou k	kilo	10^{+3}
M	mega	10^{+6}
G	giga	10^{+9}

3. O EDITOR DE ESQUEMÁTICOS

Executando-se o programa PSIM, tem-se a tela do editor de esquemáticos. Na Figura 2 está representada a tela principal do programa, mostrando seus principais botões.

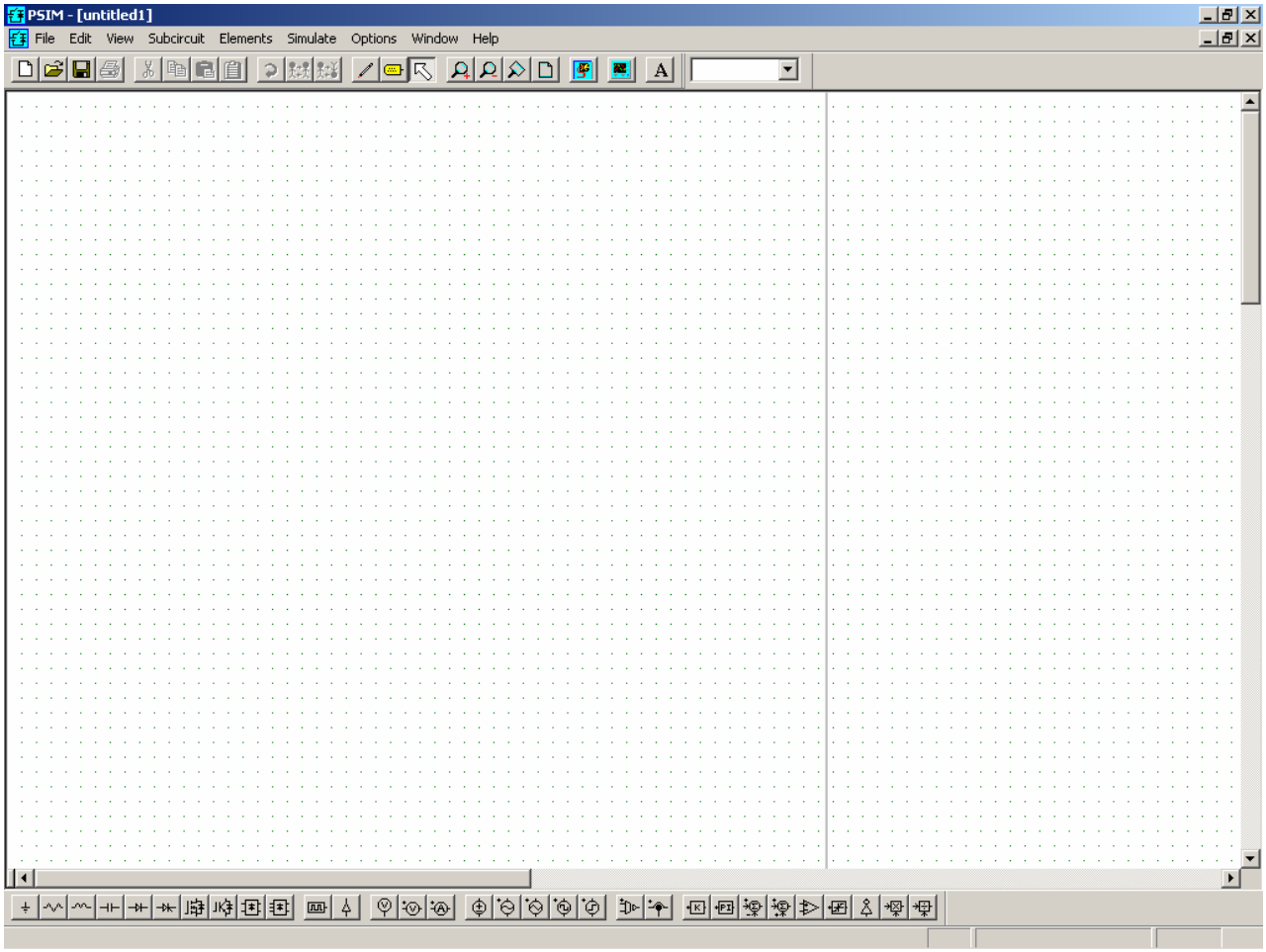


Figura 2 – Tela principal do PSIM

Na parte superior o programa apresenta um menu de opções, e uma barra de ferramentas com alguns botões de atalho. Na tabela abaixo estão descritas as funções destes botões:

	Criar arquivo.
	Abrir arquivo.
	Salvar arquivo.
	Imprimir arquivo.
	Recortar seleção.
	Copiar seleção.
	Colar.
	Copiar seleção para a área de transferência (usado para passar desenhos para outros programas, como um editor de texto).
	Gira a seleção.
	Inverter horizontalmente a seleção.
	Inverter verticalmente a seleção.
	Inserir ligações.

	Inserir marcadores (para conectar dois ou mais pontos do circuito sem utilizar ligações).
	Ferramenta de seleção.
	Zoom. Aumentar.
	Zoom. Diminuir.
	Zoom. Seleção.
	Zoom. Ajusta à página.
	Iniciar a simulação.
	Cancelar a simulação. Somente disponível durante simulações.
	Abrir o programa de visualização das formas de onda.
A	Adicionar um texto no esquema eletrônico.
	Para adicionar rapidamente um componente do mesmo tipo de algum dos últimos já adicionados.

No PSIM, todos os componentes estão dispostos no menu **Elements**. Os elementos estão divididos em quatro grupos:

- **Power (potência):** Elementos do circuito de potência, como chaves semicondutoras, resistores, indutores e capacitores;
- **Control (controle):** Elementos de controle, como filtros e componentes de eletrônica digital;
- **Sources (fontes):** Fontes de tensão e corrente
- **Other (outros):** Elementos adicionais, que são os controladores diretos das chaves semicondutoras, sensores, instrumentos de medição, elementos de interface entre potência e controle, e elementos comuns aos circuitos de potência e controle;

Na parte inferior do programa está uma barra de ferramentas, com botões de atalho para alguns dos componentes disponíveis.

	terra		fonte de tensão CC
	resistor		fonte de tensão senoidal
	indutor		fonte de tensão triangular
	capacitor		fonte de tensão quadrada
	diodo		degrau de tensão
	tiristor		sensor de tensão
	MOSFET		sensor de corrente
	IGBT		ganho proporcional
	ponte de diodos monofásica		ganho proporcional-integral
	ponte de diodos trifásica		subtrator
	comando de chaves		somador
	interface controle/comando de chaves		multiplicador

	voltímetro		divisor
	voltímetro diferencial		comparador
	amperímetro		limitador
	porta inversora		

O PSIM divide a simulação entre o circuito de potência e o circuito de controle. A Figura 3 mostra o circuito de um retificador de 12 pulsos controlado, onde se mostra a divisão entre os circuitos de potência e de controle. É importante destacar os seguintes elementos no circuito de potência, que não são usuais nos simuladores baseados no SPICE:

- Fontes de tensão senoidais trifásicas. O PSIM possui modelo de fontes trifásicas simétricas e equilibradas;
- Transformadores trifásicos com ligação Y-Y e Y-Δ;
- Pontes retificadoras trifásicas a tiristor;
- Cargas RL;
- Voltímetros (V) e amperímetros (A), usados para medir a tensão e corrente instantânea, respectivamente.

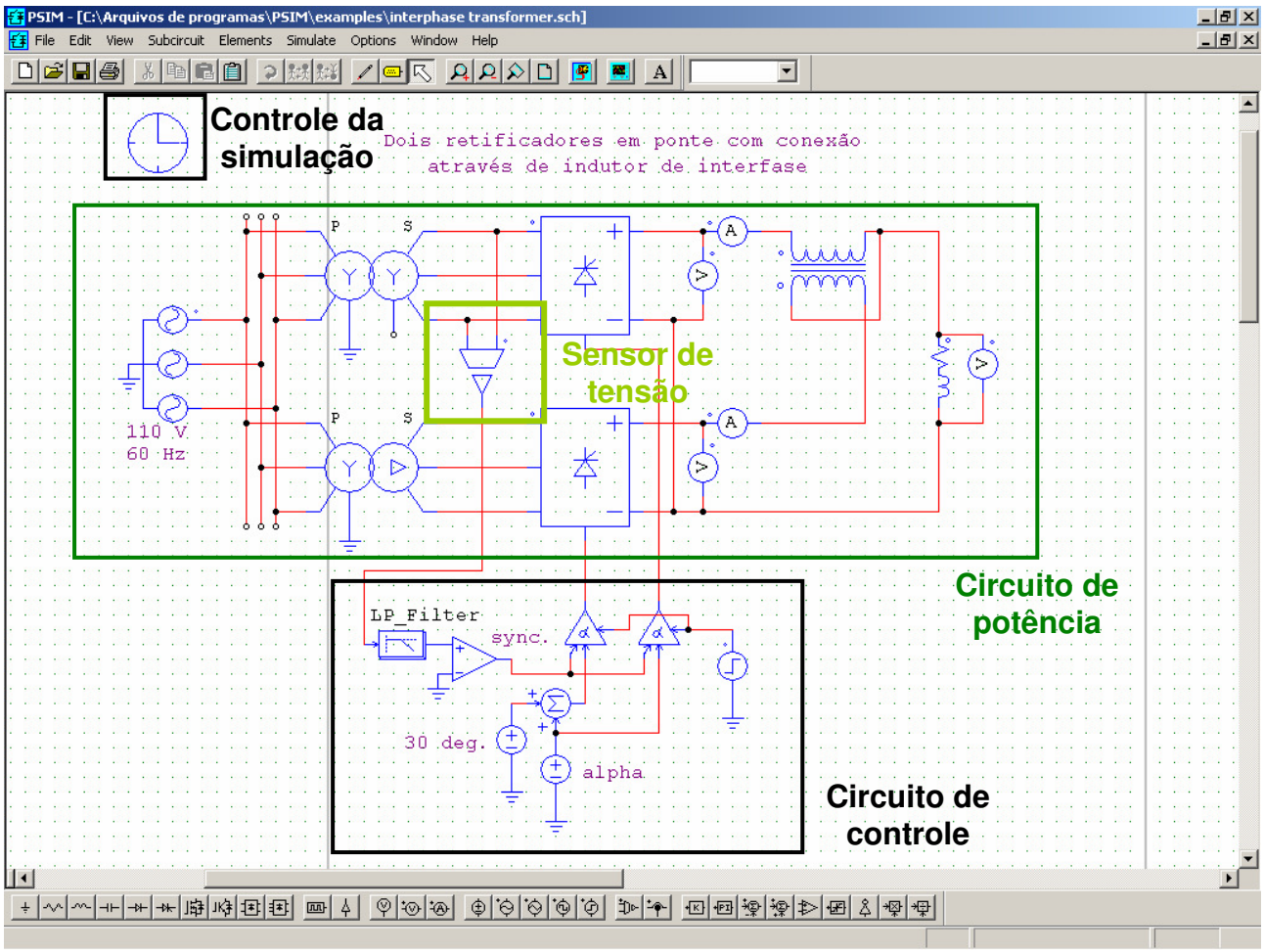


Figura 3 – Circuito exemplo mostrando os principais blocos do PSIM

O circuito de controle também é simplificado, podendo ser implementado através de diagrama de blocos. Observa-se neste circuito:

- Um bloco que implementa um filtro passa-baixas (LP_filter). Existem blocos para implementar leis de controle, tais como blocos PI, PID, multiplicadores, somadores, divisores, valor rms, controle digital, etc;
- A presença de comparadores (representado como um amplificador operacional). É importante ressaltar que, normalmente, estes elementos não funcionam como amplificadores operacionais;
- A existência de elementos para geração de comando (no caso, o ângulo de disparo dos tiristores). Este elemento, neste caso, também faz ligação do circuito de controle para o circuito de potência. O sinal de comando para acionar os semicondutores, neste simulador, é do tipo lógico (0=off, 1=on);
- A utilização de fontes para a geração de valores constantes (fonte cc), formas de onda triangular, quadrada, senoidais, etc;
- A utilização de Voltímetros (V) também podem ser usados para verificar as variáveis internas do circuito de controle;

A ligação entre os circuitos de potência e controle se dá através de sensores de tensão e sensores de corrente, e entre os circuitos de controle e potência através de controladores de acionamento ou elementos de ligação (não mostrados na Figura 3). É importante destacar que um **sinal de potência não pode ser ligado diretamente no circuito de controle**. É indispensável o uso de um **sensor** entre eles.

É importante destacar o controlador de simulação. Este controlador é obrigatório, pois nele são definidos os tempos de simulação e o passo de simulação. Mais detalhes serão mostrados a seguir.

4. PRIMEIRA SIMULAÇÃO

A melhor forma de se aprender a trabalhar em um simulador de circuito é fazendo simulações. Fazer algumas simulações requer vários fundamentos, ou seja, é necessário:

- Criar o arquivo de entrada, ou arquivo do circuito;
- Rodar o simulador;
- Inspecionar os resultados obtidos;

Inicialmente é mostrado, na Figura 4, um simples retificador monofásico com filtro capacitivo para introduzir o funcionamento do PSIM. Isto mostrará os fundamentos de uma simulação de circuito de forma breve para então rapidamente se atingir um resultado bem sucedido. Este circuito não possui nenhum interruptor controlado, sendo somente formando por um circuito de potência.

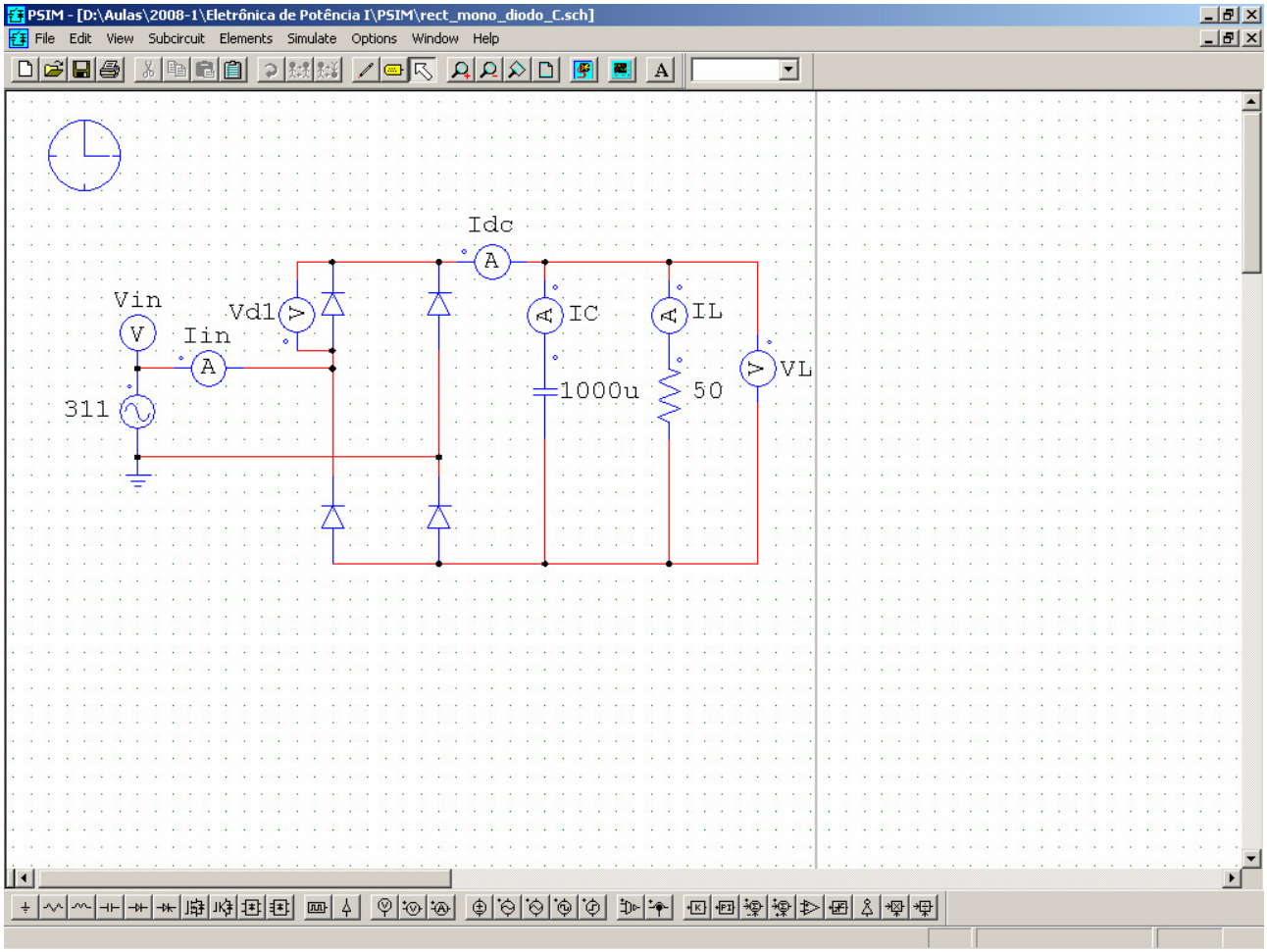


Figura 4 – Esquemático de um retificador a diodo no PSIM

Para desenhar o circuito no PSIM, utiliza-se o seguinte procedimento:

1. Criar um novo arquivo. Isto é feito indo-se no menu **File -> New**, ou simplesmente clicando-se no botão .

2. Iniciar a inserir os componentes. Para inserir a fonte de tensão senoidal, seleciona-se no menu **Elements -> Sources -> Voltage -> Sine**. Observe que existem vários tipos de fontes no PSIM, tanto de tensão quanto de corrente. Outra opção para a fonte de tensão senoidal é utilizar o botão , presente na barra de ferramentas inferior do programa. Com isso, o cursor do mouse fica com a forma do componente. Para rotacionar o componente em 90º, basta clicar com o botão direito do mouse. Para colocar o componente em um determinado lugar da área de edição, basta clicar com o botão esquerdo do mouse.
   Mesmo após a colocação do componente, o cursor do mouse permanece com a forma do componente, permitindo que seja inserido outro componente igual. Para retornar ao cursor normal, deve-se pressionar a tecla **ESC**, ou utilizar o botão , na barra de ferramentas superior. Outra opção é selecionar outro componente, ou outra ferramenta de edição.

3. Editar os parâmetros dos componentes. Uma vez que o cursor do mouse esteja com sua forma normal, podem-se selecionar as propriedades de um componente dando-se dois cliques sobre o mesmo. Com isso, uma janela com as propriedades aparecerá na tela. As propriedades variam, de acordo com o componente selecionado. Na Figura 5 estão representados os parâmetros da fonte de tensão contínua. No caso, pode-se alterar o nome e o valor do componente, e definir se estas propriedades devem ou não aparecer no esquema. Além disso, podem-se alterar outras informações sobre o componente (other info), e a cor (color) do mesmo. Entretanto, as informações adicionais (other info) e a cor do componente (color) não afetam os resultados da simulação. A opção display ao lado de cada item permite que o parâmetro seja mostrado no esquemático do circuito.

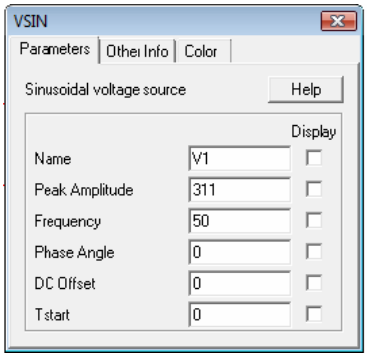


Figura 5 – Parâmetros da fonte de tensão alternada

4. Para os demais componentes, repetem-se os passos 2 e 3.

5. Inserir o componente que indica o ponto de referência (terra) do circuito. Este componente é importante, pois serve de referência para as medições realizadas. Sua inserção é obrigatória, pois caso não seja colocado este ponto de referência, o simulador informará que ocorreu um erro. Este componente está no menu **Elements -> Other -> Ground**. Outra opção é utilizar o botão , presente na barra de ferramentas inferior do programa.

6. Conectar os componentes. Para realizar as conexões, primeiramente seleciona-se a ferramenta apropriada, clicando-se no botão , na barra de ferramentas superior. com isso, o cursor do mouse fica com o formato de um lápis. Para conectar dois pontos, clica-se com o botão esquerdo do mouse no primeiro ponto, e mantendo-se pressionado o botão do mouse, leva-se o cursor até o segundo ponto, e solta-se o botão. Pode-se notar que o programa realiza até uma curva de 90º.

7. Selecionar as variáveis de saída. A seleção dos pontos do circuito que o programa irá adicionar ao arquivo de saída é feita através da adição de instrumentos de medida. Para observar-se tensão, deve-se utilizar um dos dois tipos de voltímetro disponíveis: um que mede a tensão de um determinado nó em relação ao componente terra, e o diferencial, que mede a tensão entre seus dois terminais. Esses componentes estão no menu **Elements -> Other -> Probes -> Voltage Probe / Voltage Probe** (node-to-node), respectivamente. Outra opção é utilizar os botões e, presentes na barra de ferramentas inferior do programa. Além disso, para a medição de corrente, existem duas opções: a utilização de amperímetro ou selecionando nos parâmetros do componente. O

componente amperímetro está no menu **Elements -> Other -> Probes -> Current Probe** e na barra de ferramentas inferior do programa, no botão. A maioria dos componentes apresenta em seus parâmetros o item **Current Flag**, onde é possível selecionar 0 (sem medição de corrente) ou 1 (com medição de corrente). Neste caso, a medida da corrente neste elemento será automaticamente efetuada. Na Figura 6 estão representados os parâmetros de um resistor, que apresenta o item **Current Flag**.

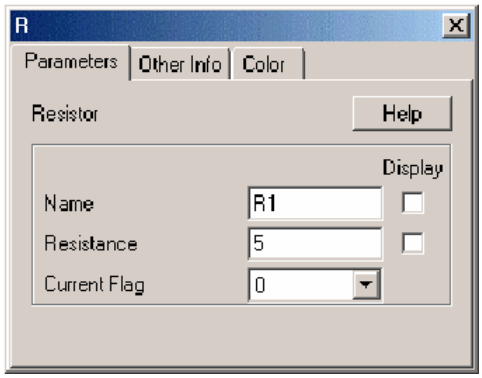


Figura 6 – Parâmetros de um resistor

8. Salvar o arquivo. Para salvar o arquivo com o circuito desenhado, pode-se utilizar os comandos **File -> Save / Save As**, ou o botão , na barra de ferramentas superior. Desta forma irá aparecer a janela padrão do windows para salvar arquivos, onde pode ser alterado o caminho e o nome do arquivo. O arquivo deve ser salvo com a extensão .sch.

Na Figura 5 está representado o retificador desenhado no PSIM. Pode-se notar nesta figura o nome e o valor dos componentes, bem como a posição dos voltímetros e amperímetros.

Observação: o voltímetro do tipo tem como referência o Ground especificado no circuito, enquanto é utilizado para medir a diferença de potencial entre os nós do desenho. Assim como para utilizar-se o amperímetro deve-se abrir o circuito e inserí-lo em série com o mesmo.

Para que o circuito possa ser simulado é necessário definir os parâmetros de simulação do mesmo. Para isso, é necessário incluir o controle de simulação, localizado no menu **Simulate -> Simulation Control**. Depois de ser adicionado ao esquema, uma tela com os seus parâmetros é mostrada. Na Figura 7 está representada esta tela, cujos parâmetros são explicados na tabela a seguir.

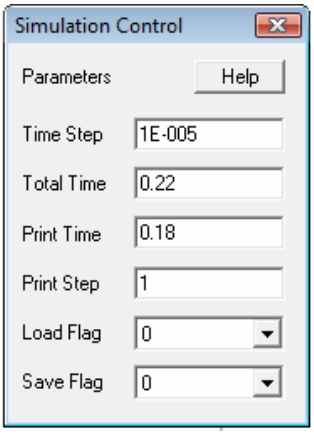


Figura 7 – Parâmetros para simulação

Time Step	Passo utilizado na simulação, em segundos.
Total Time	Tempo total da simulação, em segundos
Print Time	Tempo inicial para salvar os dados, antes de a simulação atingir este tempo, nenhum dado é salvo.
Print Step	Passo para salvar os pontos. Se 1, todos os pontos são salvos. Se 10, apenas 1 em cada 10 pontos é salvo. Isso ajuda a reduzir o tamanho do arquivo de saída.
Load Flag	Para ler os valores iniciais. Se 1, o simulador irá ler os valores iniciais de um arquivo com a extensão ssf.
Save Flag	Para salvar os valores finais. Se 1, o simulador irá salvar os valores finais da simulação em um arquivo com a extensão ssf.

Com os parâmetros da simulação definidos, pode-se simular o circuito. Isso é realizado através do botão , na barra de ferramentas superior. Na barra inferior do programa irá surgir um indicativo do percentual da simulação já atingido. Além disso, o botão apertado irá mudar seu desenho para . Este botão poderá ser utilizado agora para parar a simulação. Uma vez terminada a simulação, pode-se executar o programa Simview. Para isso, existe na barra de ferramentas superior o botão . Pode-se configurar o programa PSIM para que ele automaticamente execute o Simview quando as simulações terminarem. Para isso, deve-se selecionar o item **Auto-run SIMVIEW**, no menu **Options.**

5. VISUALIZANDO OS RESULTADOS

Executando-se o programa **SIMVIEW**, tem-se a tela do mostrador de formas de onda. Na figura a seguir está um exemplo da tela principal deste programa, obtida após a simulação de um circuito.

Na tela inicial, mostrado na Figura 8, há uma janela onde estão relacionadas todas as medidas disponíveis para serem mostradas. Estas medidas são aquelas definidas no circuito desenhado no PSIM. Abaixo está a janela obtida para o circuito desenhado na seção anterior.

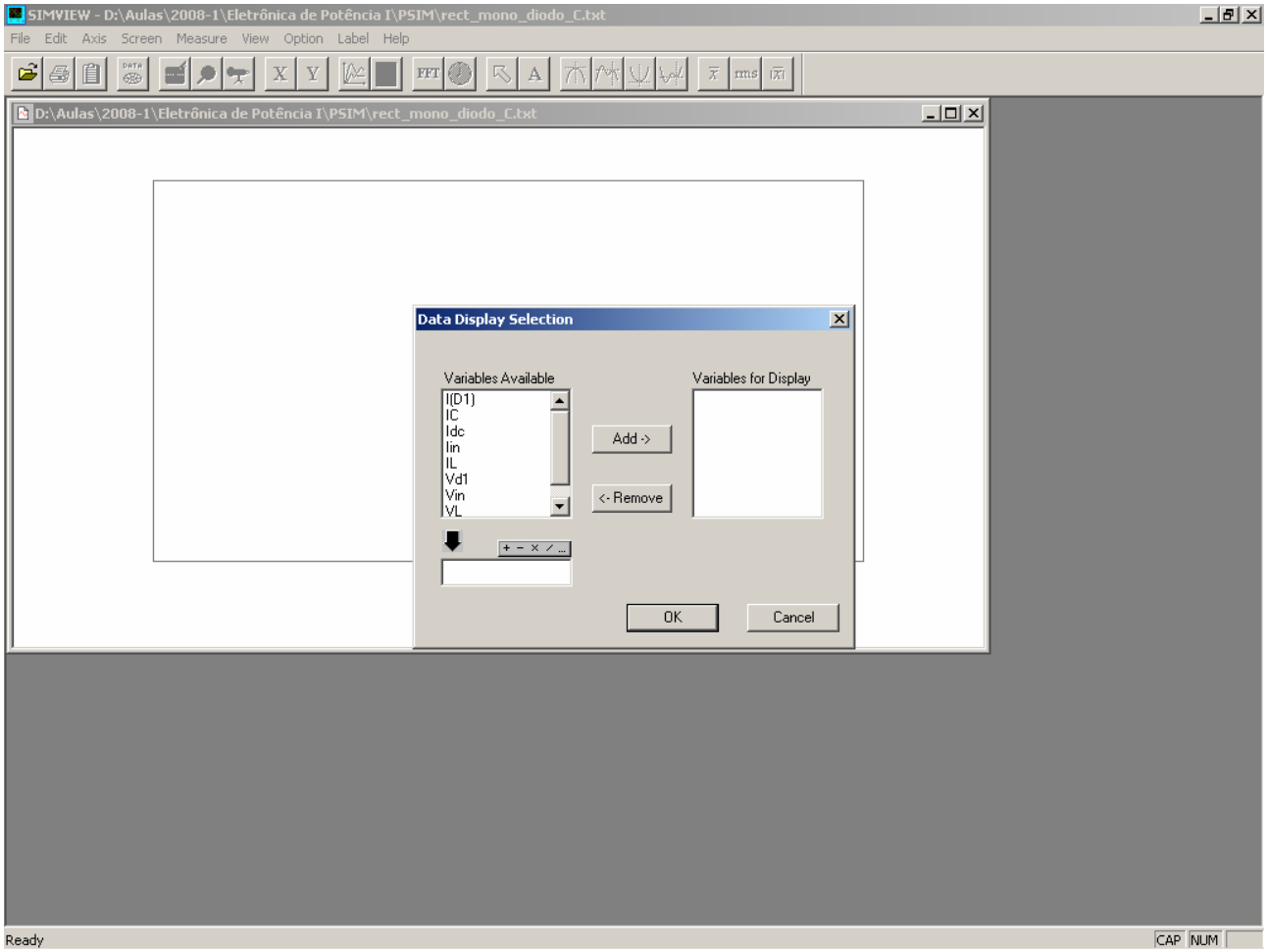


Figura 8 – Tela de abertura do SIMVIEW

Na tela inicial há uma janela, onde estão relacionadas todas as grandezas disponíveis para serem mostradas. Estas grandezas são aquelas definidas no circuito desenhado no PSIM. Abaixo está a janela obtida para o circuito desenhado na seção anterior.

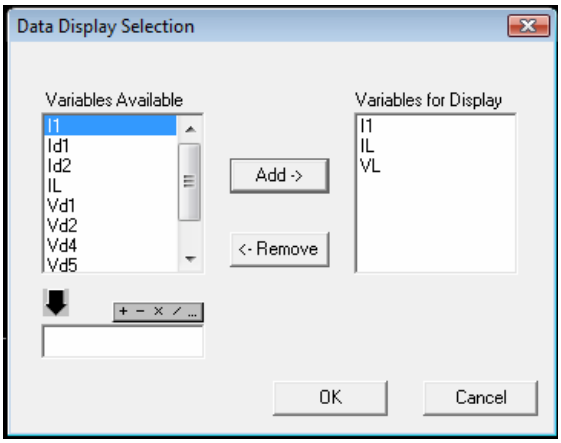


Figura 9 – Janela para seleção de formas de onda

Para adicionar uma forma de onda deve-se selecioná-la e clicar no botão **Add**. Por outro lado, para retirar uma forma de onda já selecionada, basta selecioná-la e clicar no botão **Remove**. A Figura 10 mostra o resultado de simulação.

Figura 10 – Resultado obtido na simulação (tensão VL, corrente iL)

Também é possível realizar funções matemáticas simples entre as variáveis disponíveis. Para isso deve-se utilizar o campo de edição presente na parte inferior da janela. Como exemplo, mostraremos o gráfico da potência instantânea de saída VL*IL:

Ao abrir a tela inicial do **SIMVIEW** , na janela **Data Display Selection** é possível localizar as ferramentas de edição matemática no canto inferior esquerdo da janela.

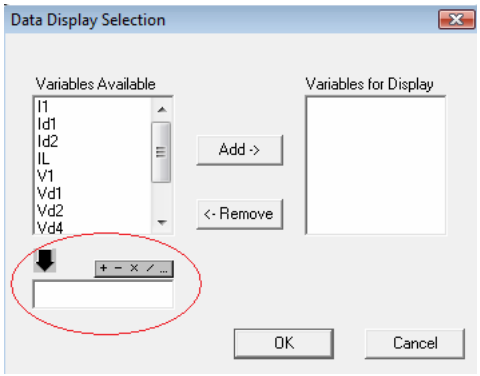


Figura 11 – SIMVIEW ferramentas de edição matemática

Seleciona-se então a variável **VL**, clicando em seguida no botão , depois seleciona-se a operação matemática clicando no botão + - × / ... e então a próxima variável **IL**. Note que a caixa de texto preenche-se com a fórmula matemática editada. Novamente utilizamos o botão **Add** e verificamos que a fórmula passa para a caixa de texto da esquerda **Variables for Display.** Finaliza-se com o botão OK. A Figura 12 mostra o resultado obtido.

Pode ocorrer a necessidade, depois de selecionadas as variáveis apresentadas no exemplo acima, de adicionar outra variável. Caso esta variável já tenha sido medida na simulação, não é necessário executar a simulação novamente, basta ir até o menu **Screen -> Add/Delete Curve.** Caso contrário, será necessário se incluir um sensor e se simular novamente.

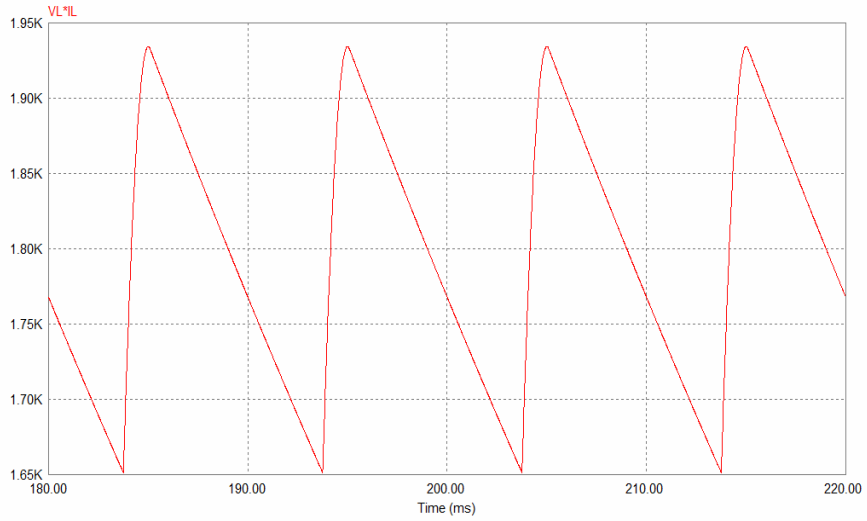


Figura 12 – Potência instantânea na carga

O programa **SIMVIEW** também permite que possam ser exibidos outros gráficos de simulação. Vamos como exemplo adicionar o gráfico da tensão de entrada em uma outra tela. Neste caso, basta selecionar o menu **Screen -> Add Screen**. Como resultado, obtém-se as duas formas de onda mostradas de forma concomitante, como mostra a Figura 13.

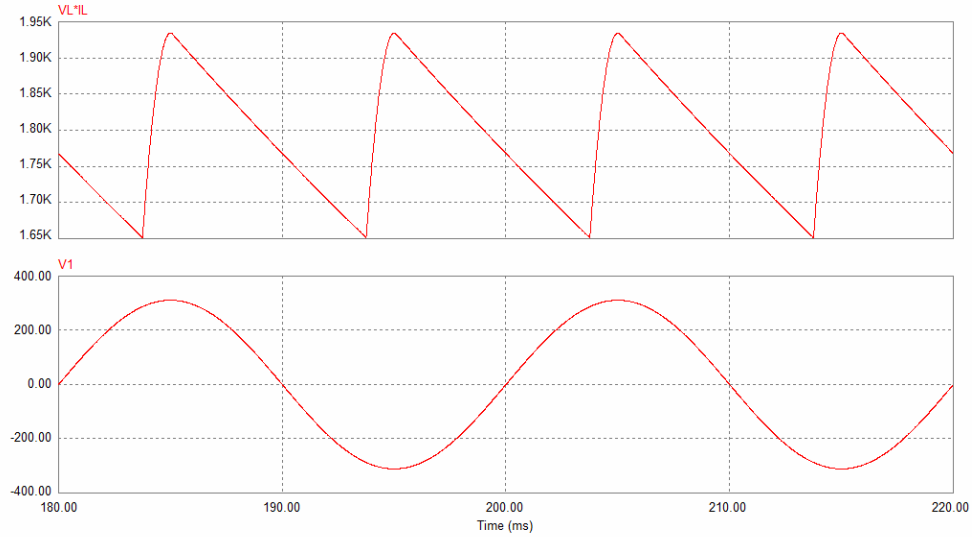
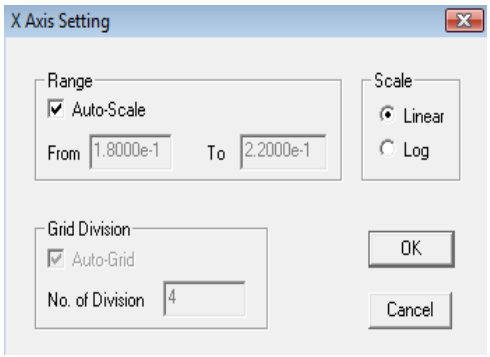


Figura 13 – Exemplo de múltiplas formas de onda

Para modificar a escala dos eixos pode-se utilizar dos botões X Y, como mostrado na Figura 14. Um exemplo da aplicação dessa ferramenta será mostrado mais adiante na seção de Análise Espectral.



Range	Escala (valor inicial e final)
Grid Division	Número de divisões da grade
Scale	Escala linear ou logarítimaca

Figura 14 – Janela de escala do eixo X

Por default o fundo da tela do **SIMVIEW** é preto, para modificar para branco, no caso da necessidade de geração de um documento para impressão basta clicar no menu: **Option -> Set Background -> Black / White.**

Também pode ser necessário enviar o gráfico para a área de transferência, para isto procede-se da seguinte forma: Clique no menu **Edit -> Copy to Clipboard.** E então utilize a opção **Colar ou Paste** no editor de texto ou gráfico de sua preferência.

Na parte superior o programa apresenta um menu de opções, e alguns botões de atalho. Na tabela abaixo estão descritos os comandos dos botões da barra de tarefas superior:

	Abrir arquivo.
	Imprimir.
	Copiar para a área de transferência (usado para passar as formas de onda para outros programas, como um editor de texto).
DATA	Reabrir o arquivo atual.
	Redesenhar os dados.
	Ferramenta de zoom.
	Para abrir a caixa de medições, e habilitar os botões de medição.
X	Para configurar as escalas do eixo horizontal.
Y	Para configurar as escalas do eixo vertical.
	Para adicionar formas de onda ao gráfico atual.
	Para adicionar formas de onda, criando um novo gráfico.
FFT	Para passar para o domínio da freqüência.

	Para passar para o domínio do tempo.
	Ferramenta de seleção.
A	Adicionar texto.
	Mostra o valor máximo da variável selecionada.*
	Mostra o próximo valor máximo da variável selecionada.*
	Mostra o valor mínimo da variável selecionada.*
	Mostra o próximo valor mínimo da variável selecionada.*
$\bar{x}$	Mostra o valor médio da variável selecionada.*
rms	Mostra o valor eficaz da variável selecionada.*
$\overline{\lvert x \rvert}$	Mostra o valor médio do módulo da variável selecionada.*

* disponível apenas quando a caixa de medições está na tela, e uma variável está selecionada

Por exemplo, para saber o valor da tensão sobre os resistores, pressiona-se o botão . Desta forma aparece uma janela com o nome **Measure**. Para que os valores apareçam nesta janela basta clicar no gráfico. Na figura a seguir está representado o resultado obtido no exemplo.

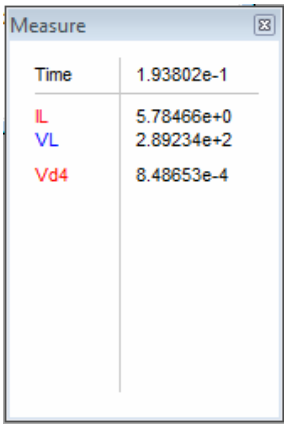


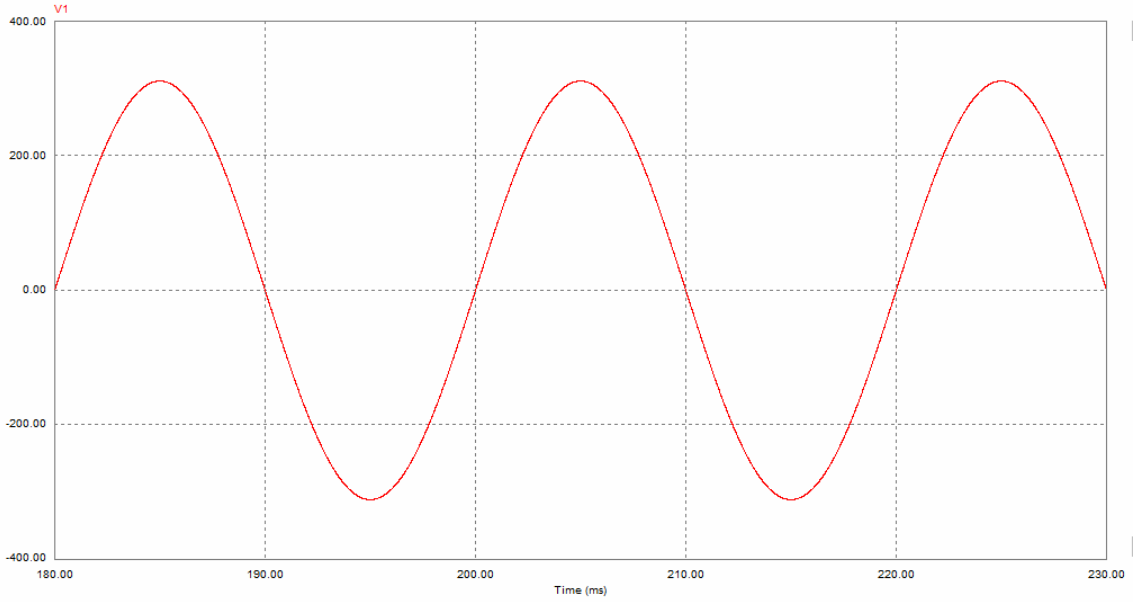
Figura 15 – Medidas obtidas na simulação

6. ANALISANDO ESPECTRALMENTE OS RESULTADOS

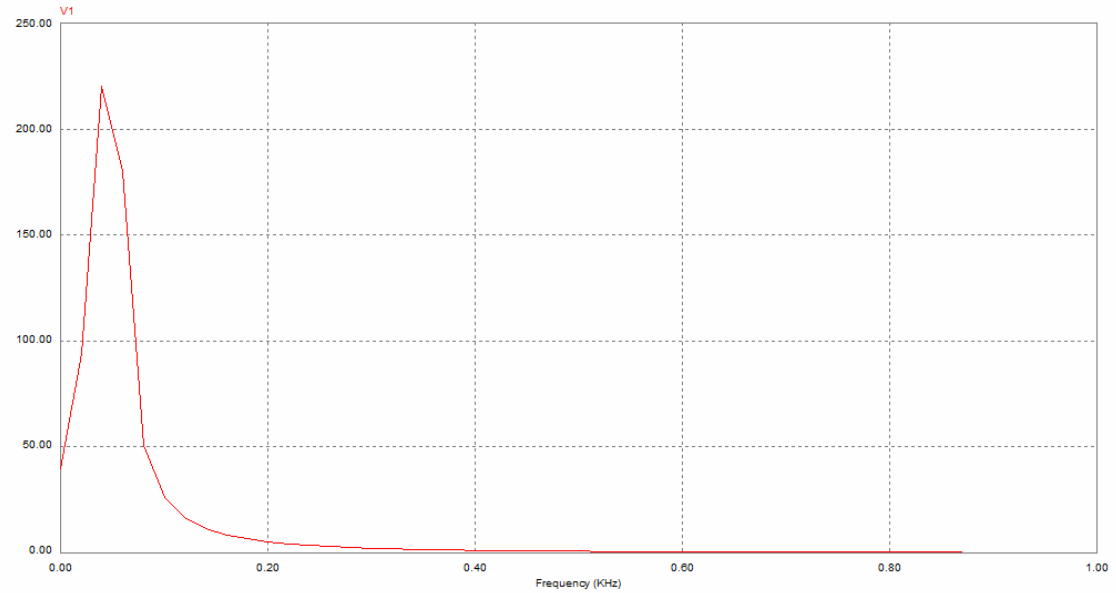
O programa **SIMVIEW** permite a rápida transformação dos gráficos do domínio do tempo para o domínio da freqüência, para isso basta clicar no botão FFT. Deve-se tomar cuidado com os parâmetros indicados na simulação como o **Time Step, Total time e Print time**, pois o usuário pode não verificar a formação correta do espectro de freqüências.

Tomando uma senóide pura no caso da tensão de entrada **Vp = 311V – 50Hz** , temos um período igual a **T = 20ms**. Logo, deve-se preencher campo **Total Time** com o valor **0.02.** Caso contrário não se analisará um ciclo inteiro, ou mais de um ciclo, que resulta em erros.

Observe o exemplo com uma análise espectral incorreta. Tomando-se a simulação do retificador com filtro capacitivo, definiu-se **Print Time** com o valor **0.18** para eliminar o comportamento transitório na análise. Neste caso, definiu-se o tempo final de simulação em **Total Time** com o valor **0.23,** que corresponde a 2 ciclos e meio da entrada. Empregando-se o comando FFT e fazendo os ajustes de escala no eixo **X**, chega-se na resposta mostrada na Figura 16.



(a)

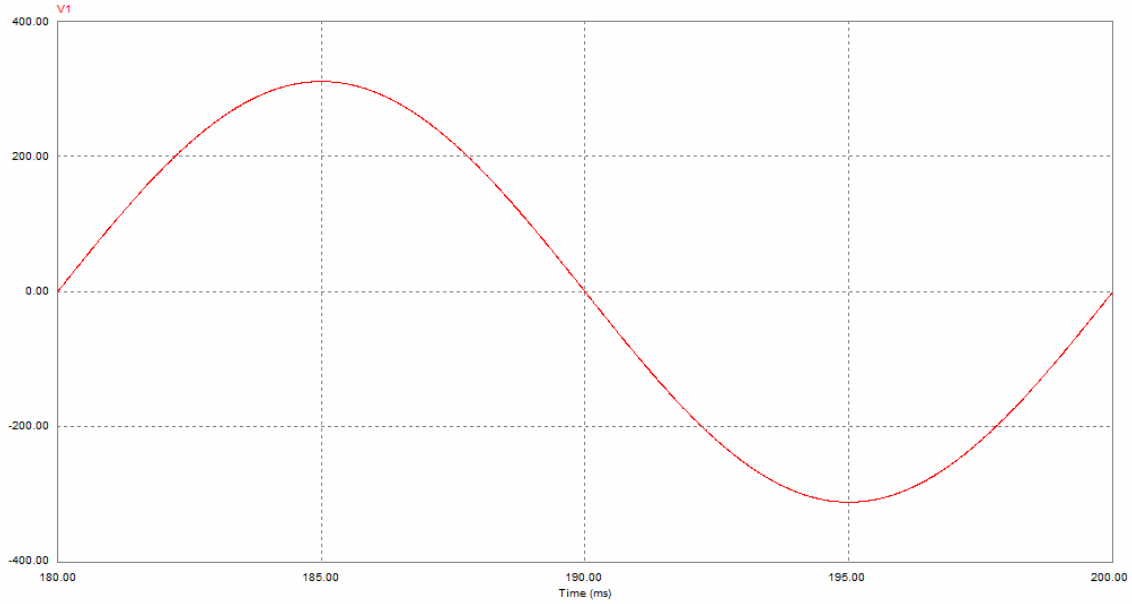


(b)

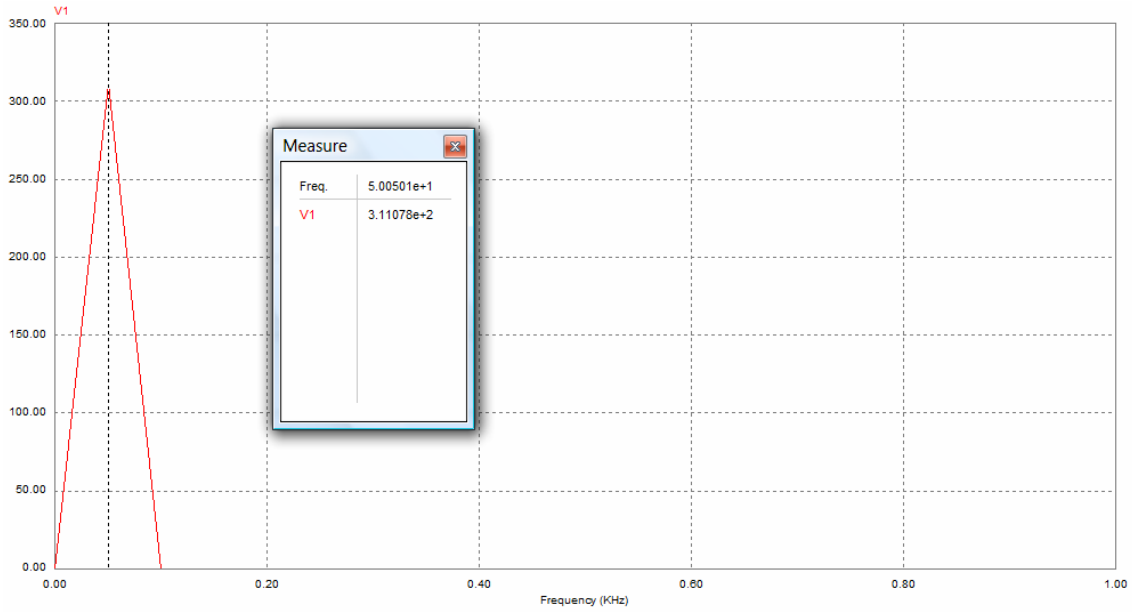
Figura 16 – Análise espectral realizada de forma incorreta. (a) Domínio do tempo (b) Espectro

Observa-se na Figura 16 que o espectro encontrado não é o correto para a senóide. Observe que para uma senóide pura o valor médio de tensão é nulo, e no gráfico apresenta um nível CC.

Por outro lado, observa-se na Figura 17 que foi realizada uma análise espectral com período correto para tensão a ser analisada. Neste caso, empregou-se no campo **Print Time** o valor **0.18** e no campo **Total Time** o valor **0.20.**



(a)



(b)

Figura 17 – Análise espectral realizada de forma correta. (a) Domínio do tempo (b) Espectro

O resultado mostra que somente existe a componente harmônica fundamental, como esperado. Nota-se também que não existe nível CC, uma vez que a senóide possui valor médio nulo. Na Figura 17(b) foi feita uma medição do valor de pico da componente harmônica fundamental, que ocorre em 50Hz. Este é o valor de pico da senóide mostrada na Figura 17(a).

Analisando a tensão de saída, obtém-se o espectro mostrado na Figura 18. Podemos observar que o espectro de harmônicas que existe nível CC, componente contínua de 300V. Também se nota que aparecem múltiplos pares da componente harmônica fundamental. Isto se explica devido a simetria par da função, que pela teoria das Séries de Fourier resulta em harmônicas pares. Logo há componentes espectrais em 100Hz, 200Hz, 300Hz, 400Hz, etc.

Por fim, analisaremos na Figura 19 a forma de onda da corrente de entrada I1. Na Figura 20 observaremos que não aparece uma componente contínua, pois o valor médio da corrente de entrada

é nulo. Observe também que aparecem múltiplos ímpares da harmônica fundamental devido à simetria ímpar da função.

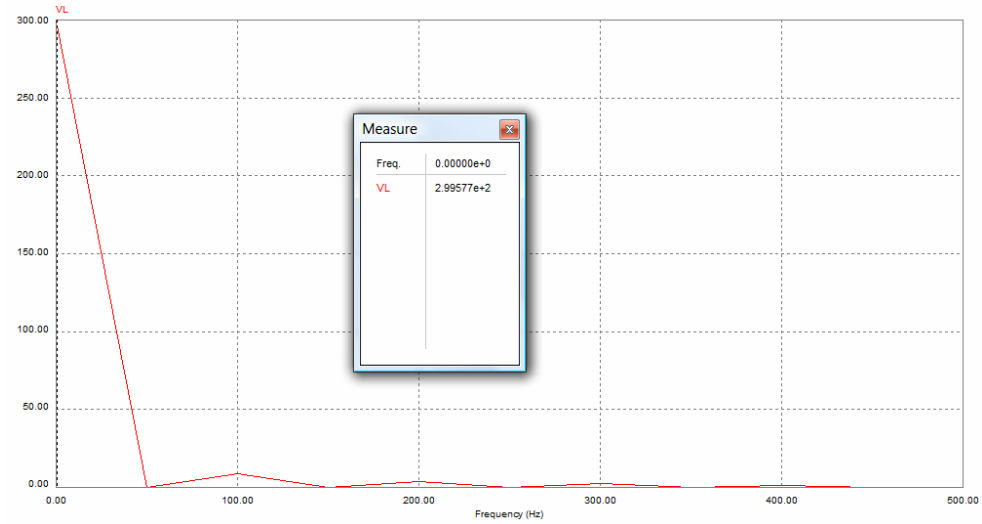


Figura 18 – Análise espectral da tensão de saída

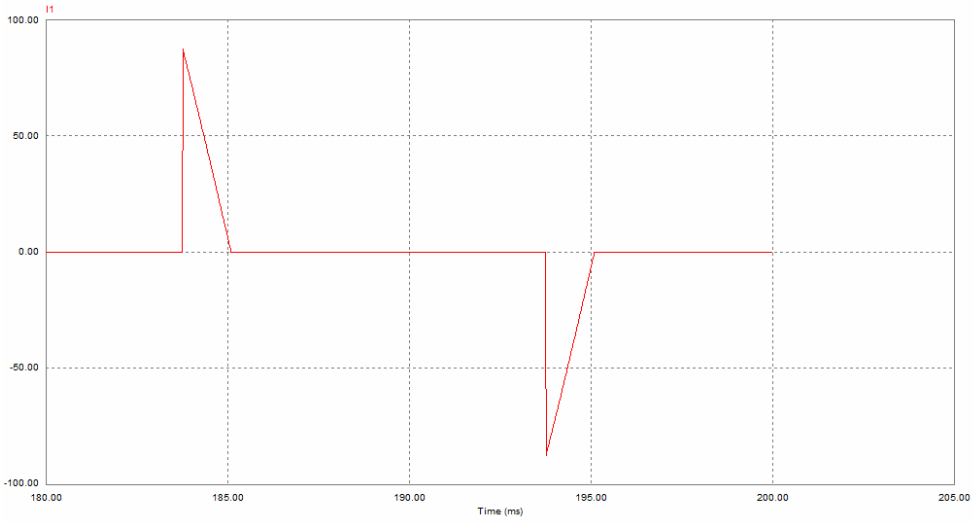


Figura 19 – Forma de onda da corrente de entrada

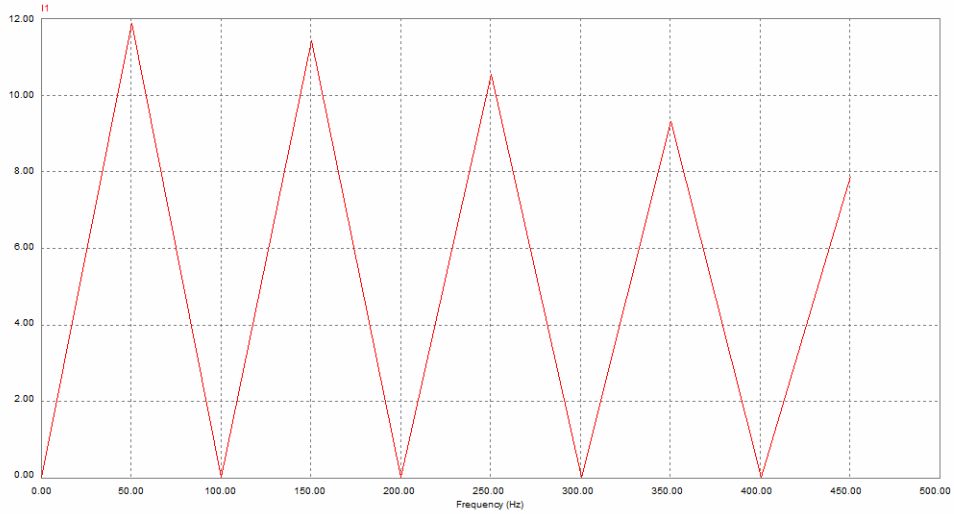


Figura 20 – Espectro da corrente de entrada

7. SIMULANDO UM CIRCUITO COM INTERRUPTORES COMANDADOS

Neste exemplo será mostrado o funcionamento de um retificador trifásico com tiristores, empregando um retificador Δ–Y, como mostra a Fig. 21.

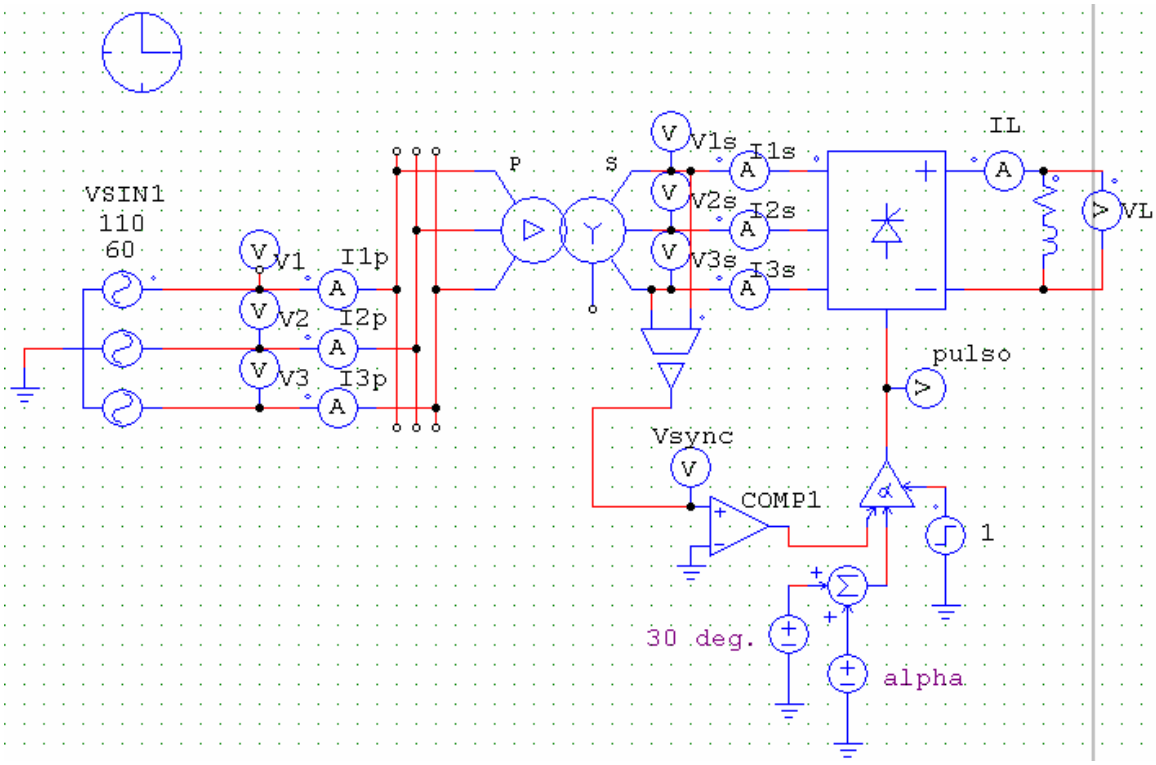


Figura 21 – Retificador Trifásico.

Este circuito contém uma fonte trifásica na entrada. Esta fonte possui os seguintes parâmetros: Tensão de Linha (rms), Freqüência e Ângulo de Fase Inicial, como mostra a Fig. 22.

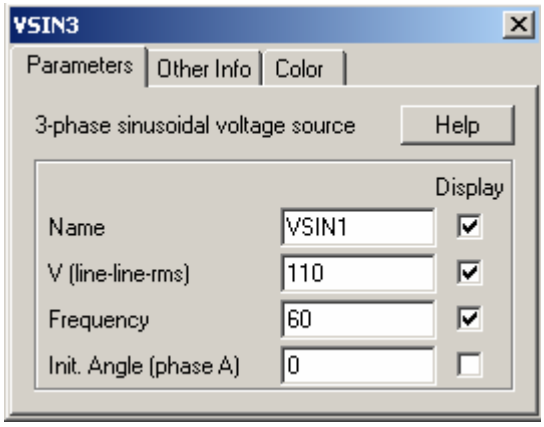


Figura 22 – Parâmetros da alimentação trifásica.

Após a fonte encontramos um transformador Δ – Y. Este transformador faz com que a tensão do secundário seja alterada em 30 graus com relação a tensão de fase do primário, além de modificar a sua amplitude. Os parâmetros deste transformador são mostrados na Fig. 23:

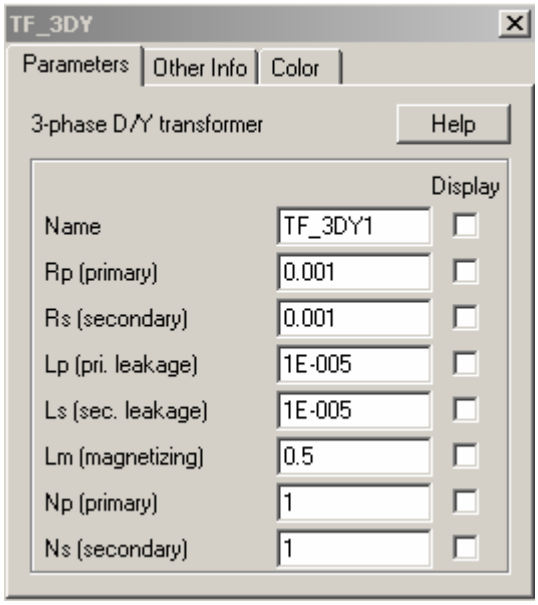


Figura 23 – Parâmetros do transformador Δ – Y.

Por fim, o circuito de potência é composto por uma ponte retificadora trifásica (mostrada em bloco único) e de uma carga RL. Cabe destacar que os amperímetros e voltímetros são usados para visualizar as variáveis do circuito simulado.

O circuito possui também um subcircuito de controle para geração dos pulsos de disparo dos tiristores. Este sistema é sincronizado com as tensões da rede, consistindo de um sensor de tensão (isolado) que mede V1s-V3s (tensão entre a fase 1 e 3 na ligação Y). Esta tensão é comparada com a referência gerando um pulso no semi-ciclo positivo (Vsync). Este pulso de sincronismo é uma das entradas do controlador do ângulo de disparo alfa, que tem como entrada também o ângulo α do pulso, e uma entrada de ativação do controlador. Os parâmetros deste controlador estão mostrados na Fig. 24. Observa-se que a freqüência e a largura do pulso de disparo são definidas pelo usuário.

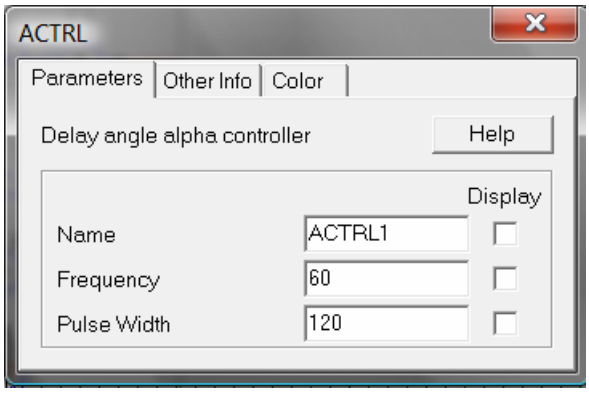


Figura 24 – Parâmetros do controlador de ângulo de disparo.

Simularemos o circuito a fim de obtermos os gráficos referentes ao seu funcionamento.

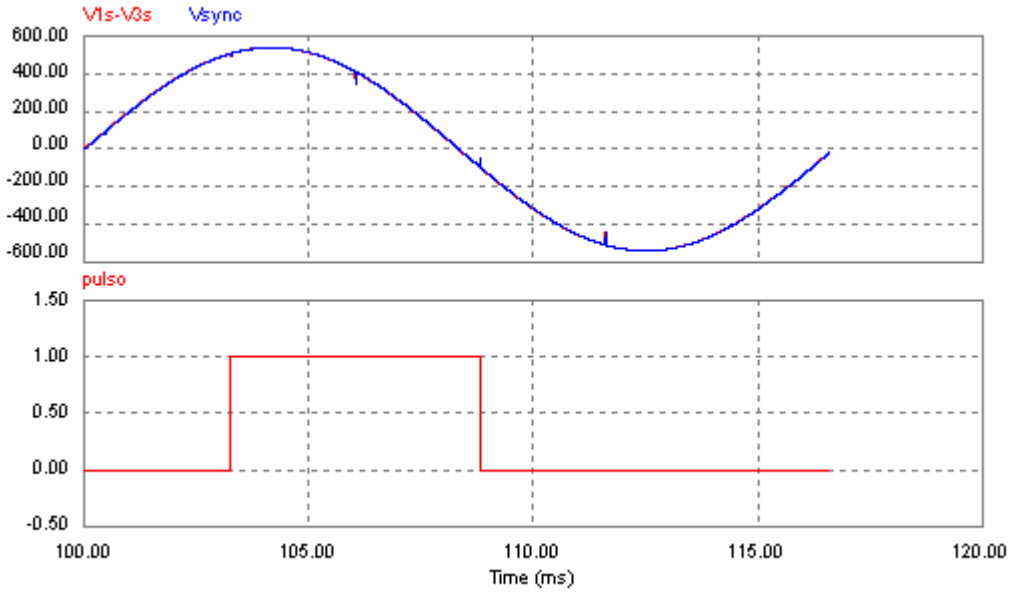


Figura 25 – Resultado da simulação do retificador trifásico. Tensão de linha secundária, tensão de sincronismo Vsync e pulso digital de disparo da ponte

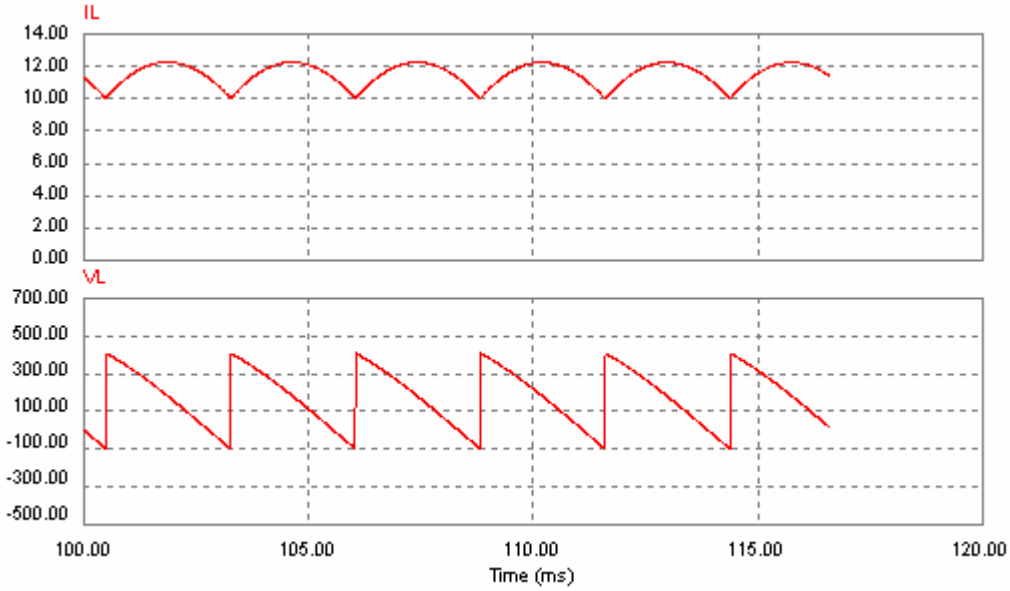


Figura 26 – Resultado da simulação do retificador trifásico: tensão e corrente de saída

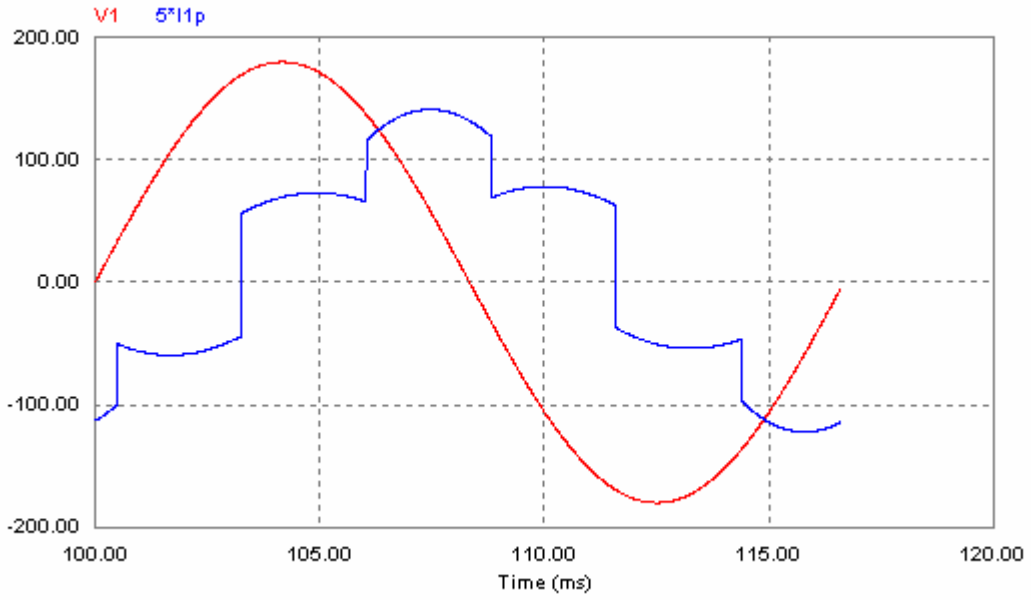


Figura 27 – Resultado da simulação do retificador trifásico: tensão e corrente de entrada (corrente com escala x5)

8. SIMULANDO UM CIRCUITO COM LEI DE CONTROLE

Neste exemplo será mostrado o funcionamento de um retificador trifásico com tiristores, empregando uma lei de controle, tal como mostrado na Fig. 28.

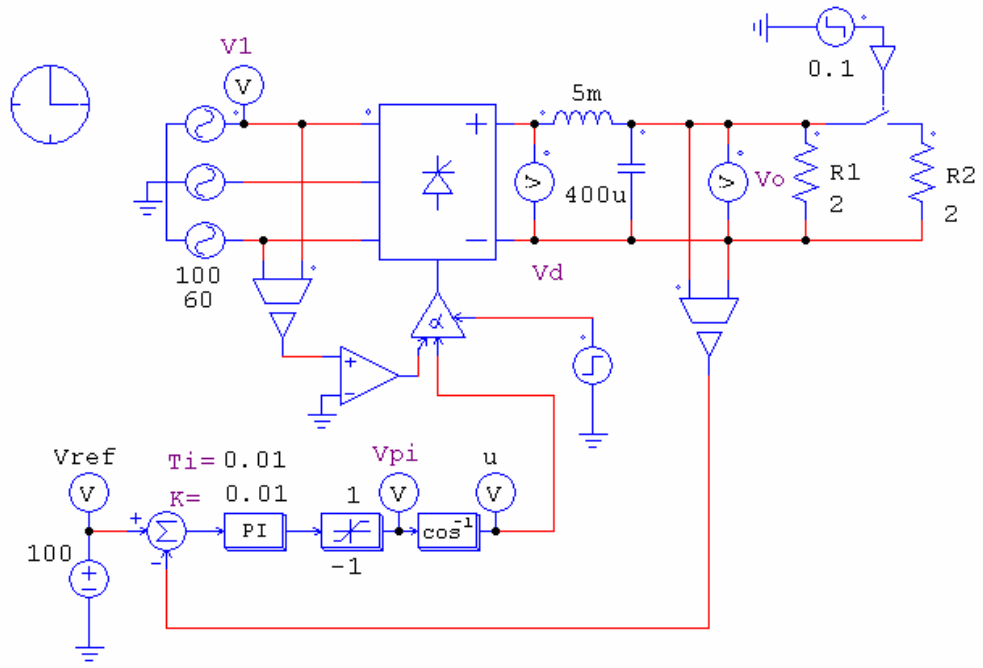


Figura 28 – Retificador trifásico operando em malha fechada

Este circuito descreve um retificado similar ao mostrado no exemplo anterior. Neste caso, não há transformador e o filtro de saída é do tipo LC. Desta forma, a variável de saída é do tipo fonte de tensão, e o que se deseja é obter uma tensão de saída regulada, mesmo diante de variações de carga. Em malha aberta, este circuito tem a resposta mostrada na Fig. 29. Observe que o circuito possui regulação em regime permanente, mas a resposta transitória é lenta.

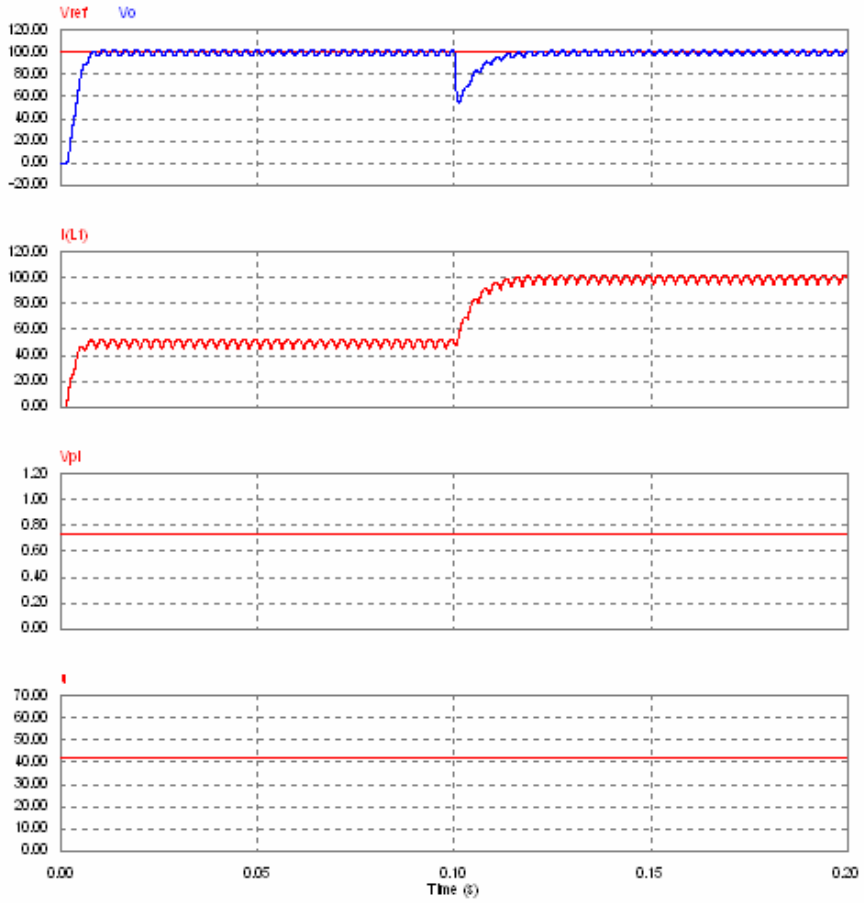


Figura 29 – Resposta de simulação do retificador trifásico operando em malha aberta

O mesmo circuito pode ser controlado em malha fechada. Através da operação em malha fechada é possível se modificar o ângulo de disparo para obter-se uma resposta transitória melhor. A Fig. 30 mostra os resultados de simulação. Observa-se que a ação de controle em malha fechada resulta numa melhor resposta transitória. Esta ação de controle é limitada pelo ângulo de disparo mínimo e máximo. É importante ressaltar que são incluídos no controlador os blocos de saturação e $\cos^{-1}$. O primeiro é usado para impedir que os ângulos de disparos possuam valores fora da faixa de atuação do conversor (menor que 0° e maior que 360º). O segundo é empregado para linearizar a ação de controle, uma vez que a relação entre o ângulo de disparo e a tensão de saída é não-linear.

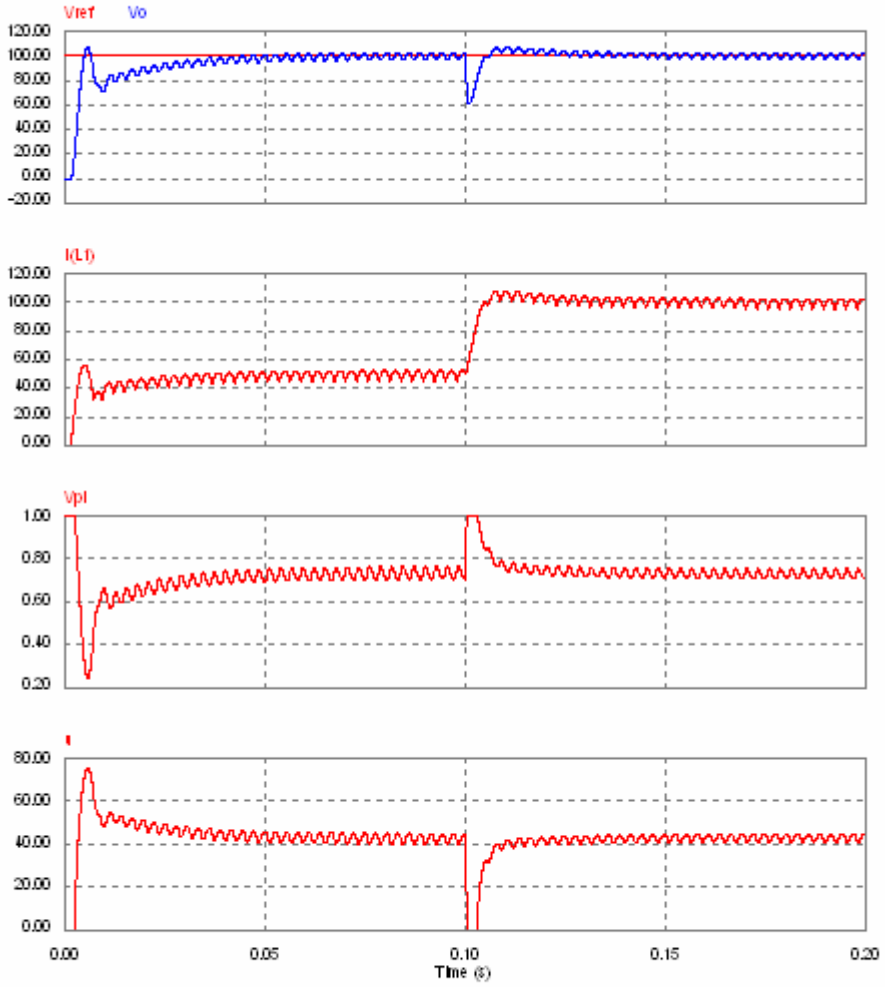


Figura 30 – Resposta de simulação do retificador trifásico operando em malha fechada

9. CONCLUSÃO

Esta apostila é uma breve introdução à simulação de conversores estáticos comutados em baixa freqüência empregando o software PSIM. É importante destacar que o software é bastante poderoso, podendo ser usado para testar vários tipos de conversores e controladores. O propósito deste material é servir como um suporte inicial para o aluno, não como um material completo. Acredita-se que este material seja suficiente para que o aluno se ambiente com o programa e possa aprender, por conta própria, os inúmeros recursos do programa.