

**Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha
Novo Hamburgo**

Semana da Eletrônica 2019

**Uso de Simulação de Circuitos no
Projeto de Retificadores Monofásicos
com Filtragem a Capacitor**

**Alexandre Simionovski
06/08/2019**

Introdução

O foco desta apresentação é mostrar o uso de simulação de circuitos no projeto de retificadores monofásicos de baixa potência ($< 500 \text{ W}$), destinados a alimentar equipamentos eletrônicos :

- Rede elétrica domiciliar (127/220 V 60 Hz);
- Transformador 60 Hz para obter uma tensão AC conveniente a partir da tensão da rede;
- Retificação em ponte (4 diodos) ou em onda completa (2 diodos);
- Filtragem com capacitor.

Vamos tratar primeiro o caso do retificador em ponte e, depois, estender o resultado ao retificador de onda completa.

O Projeto de Um Retificador Monofásico

O que é necessário atender :

Alimentar uma carga (constante / variável) com tensão DC, sob uma certa corrente máxima, com uma ondulação (ripple) determinada.

O que é necessário determinar :

- Tensão e corrente secundária do transformador;
- Capacitância do capacitor de filtro;
- Corrente nos diodos retificadores;
- Corrente através do capacitor de filtro;
- Comportamento da tensão retificada em função da variação :
 - Tensão da rede
 - Corrente na carga
 - Tolerância dos componentes

Histórico

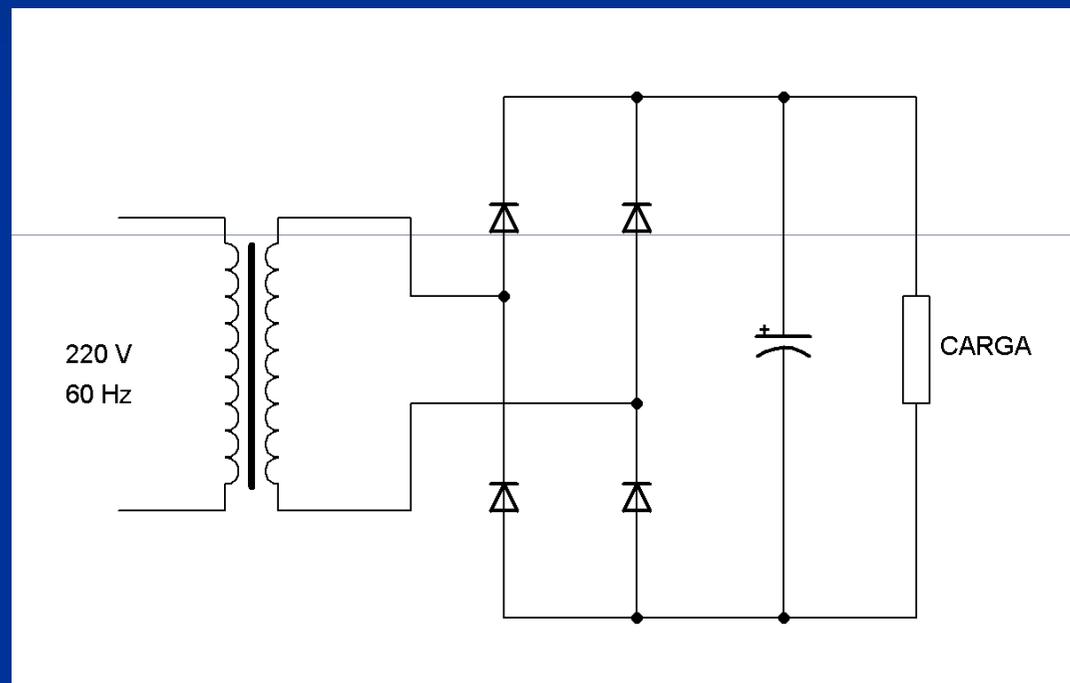
A dificuldade do projeto de um retificador com filtro capacitivo é matemática :

“ A dificuldade em se abordar o circuito (retificador) não é de ordem técnica... O problema reside no tedioso trabalho de construir soluções gráficas para equações transcendentais, executar numerosas integrações, etc ” (Martin, T. L., 1955)

- Antes de 1943 – Cut and try a partir de equações simplificadas
- 1943 – Otto Schade - curvas obtidas experimentalmente :
 - Permitem obter o fator de ripple, correntes nos diodos e tensão DC retificada em função de um parâmetro adimensional ωCR_L e da relação R_s / R_L
 - Foram desenvolvidas para diodos a vácuo (válvulas)
 - Adaptadas para uso com diodos semicondutores (Dayal, M., 1964) sem muito sucesso
- 1979 – Alexander Lieders – método analítico – nomogramas
- Anos 2000 – Fim do problema matemático - simulação !

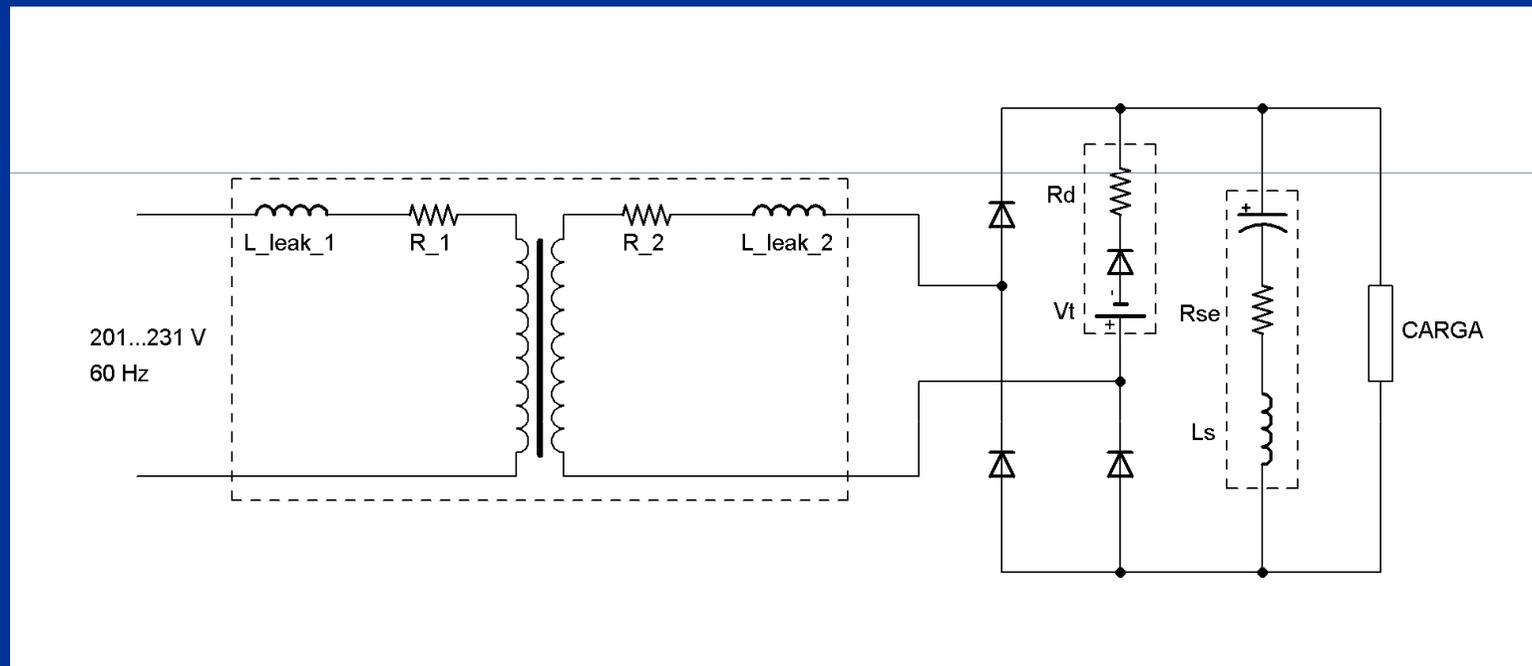
Circuito Equivalente de um Retificador em Ponte

O que o aluno monta :



Circuito Equivalente de um Retificador em Ponte

O circuito equivalente (muito simplificado) :



Variáveis Ambientais

- **Variação da rede elétrica domiciliar : + 5 %, - 8,5 % :**
 - A variação da rede se reflete na tensão de saída – tensão mínima e máxima.
 - Retificadores seguidos de regulador de tensão.
 - Em 220 V : rede pode variar de 201 V a 231 V.

- **Variação na temperatura ambiente :**
 - A temperatura ambiente pode variar de 0 °C a mais de 60 °C.
 - Reflete-se na vida útil e nos parâmetros elétricos dos componentes.

Diodo Retificador

- Tensão Inversa Máxima V_{RRM}
- Corrente Média Retificada I_{FAV}
- Corrente de Surto Máxima I_{FSM}
- A temperatura afeta a queda de tensão direta do diodo V_F ($-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$)
- Modelado por uma fonte de tensão V_F + resistência R_D + diodo ideal, ou pelo modelo SPICE fornecido pelo fabricante (mais preciso).



Capacitor Eletrolítico

- Capacitância $C_{\text{FILTRO}} (C_R)$
- Tensão de trabalho $V_{C_{\text{FILTRO}}} (V_R)$
- Corrente alternada eficaz $I_{AC,R}$
- Resistência série equivalente $R_{SE} (ESR_{\text{max}})$
- Temperatura máxima de trabalho (85 °C, 105 °C, 125 °C)
- Componente eletroquímico com vida útil limitada e grande dispersão de parâmetros (fabricação/temperatura)
- Modelado por uma capacitância ideal C_R + resistência série equivalente R_{SE} .



Capacitor Eletrolítico

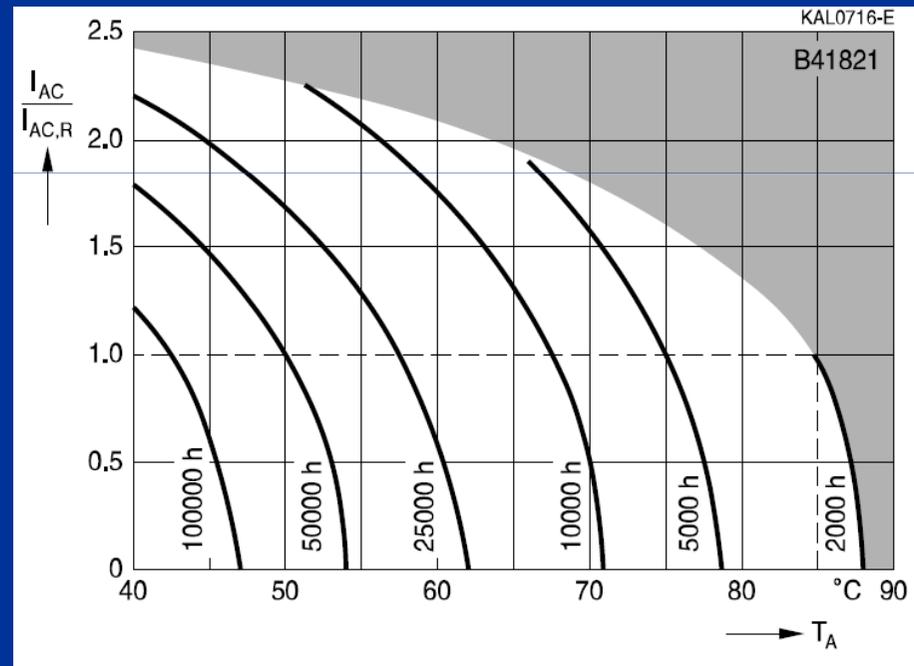
- A vida útil do capacitor eletrolítico é fortemente influenciada pela temperatura ambiente e pela corrente AC que nele circula .

- Série B41821 Epcos 85 °C

- 85 °C, V_R , $I_{AC,R}$: > 2000 h
- 40 °C, V_R , $1,3I_{AC,R}$: >100000 h

- 100000 h = 35 anos a 8 h /dia

- 2000 h = 250 dias a 8 h/dia



Transformador de Força

- Tensão primária V_1 - 120 V , 127 V , 220 V
- Tensão secundária V_2
- Corrente secundária I_2
- Regulação da tensão secundária ΔV_2
- V_2 , I_2 e ΔV_2 são determinados pelo projeto
- O aquecimento do transformador limita ΔV_2
 - Lei de Spencer
 - Quanto maior o transformador, menor o limite para ΔV_2
- Modelado pela sua tensão secundária em aberto, em série com a resistência total dos bobinados refletida para o secundário $R_T = R_2 + R_1 / n^2$.



Simuladores

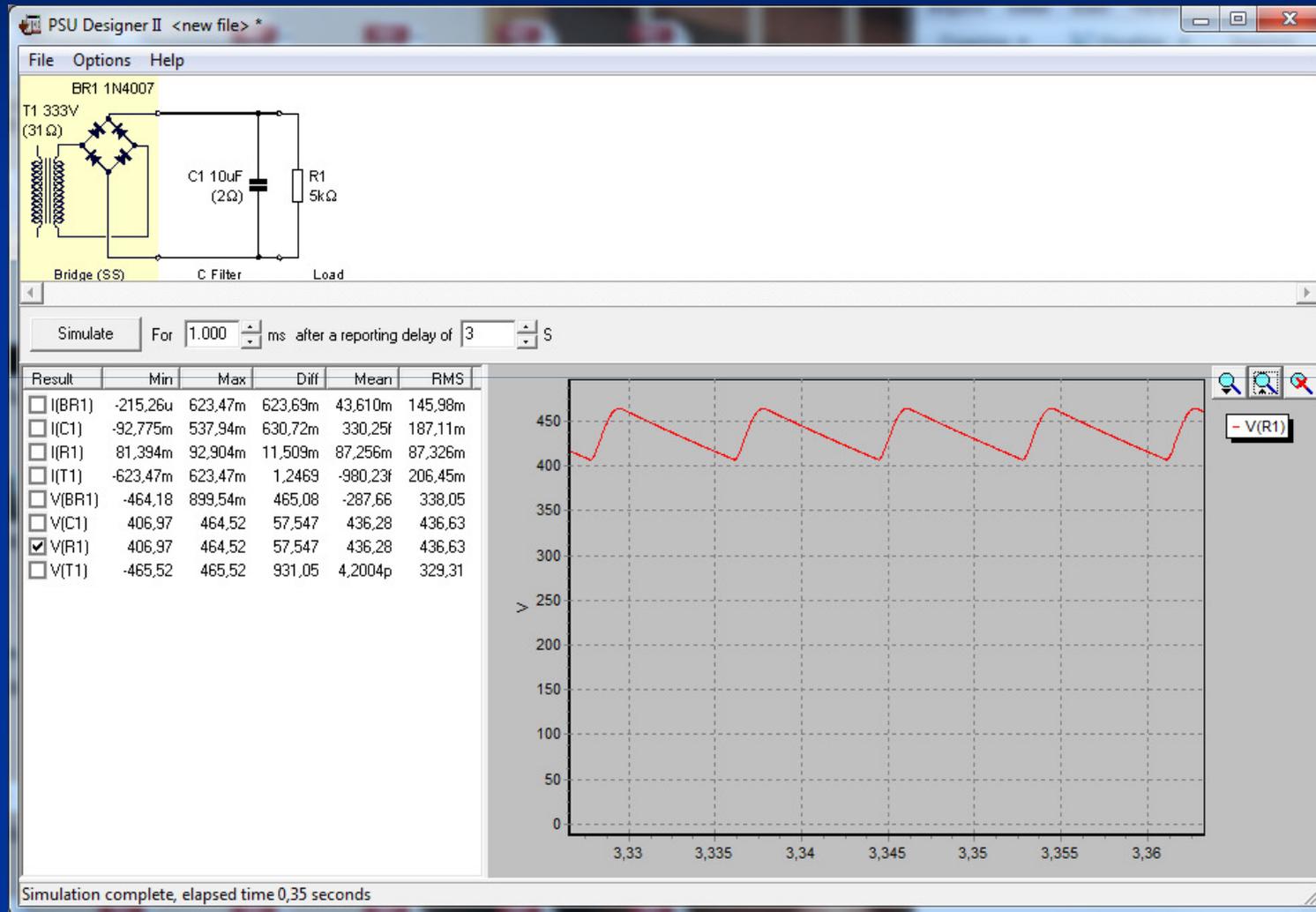
■ Simuladores SPICE

- Podem utilizar os modelos SPICE fornecidos pelos fabricantes
- Exige que se componha todo o circuito a ser simulado
- Interface gráfica pouco amigável (por ser genérica)
- LTspice
- Multisim
- Psim
- CircuitMaker
- Micro-Cap

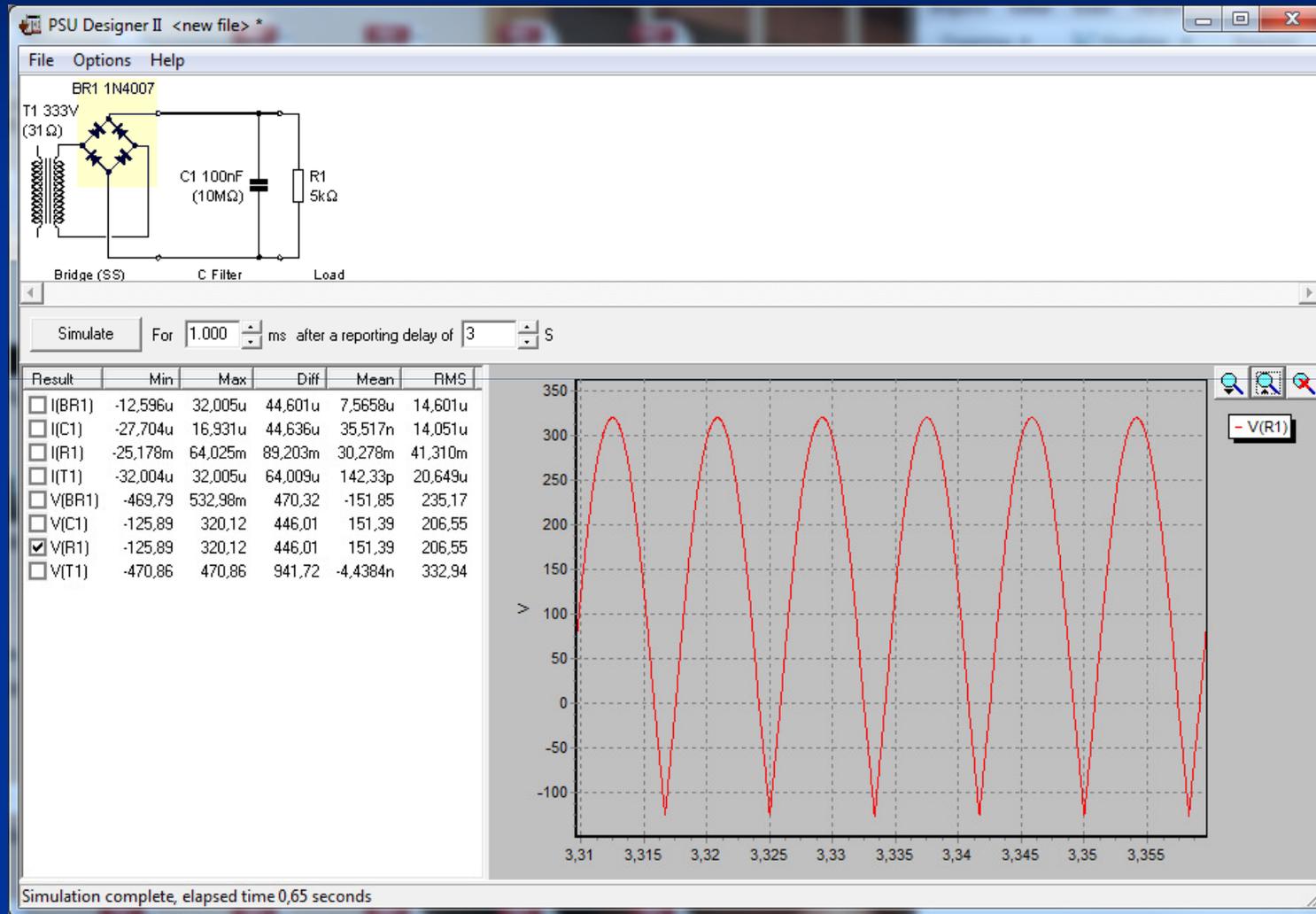
■ PSU Designer II

- Interface gráfica específica para retificadores, com circuitos pré-compostos e configurados
- Resolve as equações diferenciais do circuito com um modelo simplificado de diodo
- Resolve os circuitos com erro e os resultados devem ser conferidos com um simulador SPICE
- PSU deve ser visto como uma ferramenta de treinamento

PSU Designer II



PSU Designer II - Erro



Projeto - Início

■ Especificações de projeto:

- Tensão AC primária $V_1, V_{1_MIN}, V_{1_MAX}$
- Tensão DC média V_{DC}
- Tensões DC máxima e mínima V_{DC_MIN}, V_{DC_MAX}
- Ondulação máxima na tensão DC ΔV_{DC}
- Corrente máxima na carga I_{DC}
- Resistência de carga R_L

■ Parâmetros a serem determinados

- Transformador
 - Tensão e corrente secundárias sob carga V_2, I_2
 - Regulação da tensão secundária $\Delta V_2\% = V_{2_vazio} / V_2$ em %
- Diodos
 - Corrente média e de surto máxima I_{FAV}, I_{FSM}
 - Tensão reversa V_{RRM}
- Capacitor de filtro
 - Capacitância C_{FILTRO}
 - Corrente AC eficaz I_{AC}
 - Tensão de trabalho V_{C_FILTRO}

Projeto – Estimativas Iniciais

- Condições iniciais :
 - $\Delta V_2 = 0,1 V_2$ (10 %)
 - $\omega C_R R_L > 40$ (ω calculado a 120 Hz)
- $V_2 = 0,92 V_{DC}$
- $I_2 = 1,6 I_{DC}$
- $R_T = 0,1 V_2 / I_2$
- $C_{FILTRO} > I_{DC} / (120 \Delta V_{DC})$
- $V_{C_FILTRO} > V_{DC_PK} = 1,4 (V_{1_MAX} / V_1) (1 + \Delta V_2 \% / 100) V_2$
- R_{SE} é obtido a partir de C_{FILTRO} e V_{C_FILTRO} no catálogo do fabricante
- Diodos são escolhidos para $I_F \sim I_{DC}$, $I_{FSM} \sim 1,4 V_2 / R_T$ e $V_{RRM} > 3...3,5 V_{DC_PK}$

Projeto – Exemplo

- Retificador para alimentar uma fonte regulada de 0-20 V 1 A :
 - Tensão primária 220 V (201 V a 231 V)
 - Tensão DC mínima : 25 V a $V_1 = 201$ V
 - Corrente I_{DC} máxima : 1 A (independe da tensão V_{DC} pois há um regulador)
 - Regulagem do transformador : 10%
 - Ondulação : 10% de V_{DC}
- Estimativas iniciais :
 - V_{DC} a 220 V : 28,8 V
 - ondulação $\sim 3 V_{P_P}$
 - $V_2 = 0,92 * 28,8 = 27 V_{rms}$
 - $I_2 = 1,6 * 1,0 = 1,6 A_{rms}$
 - $R_T = 0,1 * 26,5 / 1,6 = 1,7 \Omega$
 - $C_{FILTRO} = 1,0 / (120 * 3) = 2800 \mu F$
 - $V_{C_FILTRO} = V_{DC_PK} = 1,4 * (231 / 220) * (1 + 10/100) * 27 = 44$ V
 - $R_{SE} = 0,08 \Omega$ para um capacitor B41821 3300 μF 50 V e $I_{AC,R} = 2,5$ A
 - Diodos escolhidos : 1N4007 com $I_{FAV} = 1,0$ A
 - Valores arredondados para cima.

Projeto – Configurando o Transformador

The screenshot shows the PSU Designer II software interface. The main window displays a circuit diagram with a transformer (T1, 29.7V, 1.6875Ω), a bridge rectifier (BR1, 1N4007), a capacitor filter (C1, 3.3mF, 80mΩ), and a load (I1, 1A). The simulation parameters are set to 1.000 ms with a reporting delay of 3 s. A table of simulation results is visible, and an 'Off-Load Voltage Calculator' dialog box is open, showing manufacturer data and calculated results.

Result	Min	Max	Diff	Mean	RMS
<input type="checkbox"/> I(BR1)	-17.160u	4.0242	4.0243	500.00m	1.2784
<input type="checkbox"/> I(C1)	-1.0000	3.0242	4.0243	12.519p	1.5062
<input type="checkbox"/> I(I1)	1	1	0	1	1
<input type="checkbox"/> I(T1)	-4.0242	4.0242	8.0485	272.18f	1.8079
<input type="checkbox"/> V(BR1)	-35.164	1.1277	36.292	-21.529	26.079
<input type="checkbox"/> V(C1)	33.447	35.231	1.7836	34.356	34.360
<input type="checkbox"/> V(I1)	33.447	35.231	1.7836	34.356	34.360
<input type="checkbox"/> V(T1)	-36.641	36.641	73.282	-2.7943p	27.462

Simulation complete, elapsed time 0,42 seconds

Off-Load Voltage Calculator

Manufacturers data

Nominal output V A

Regulation %

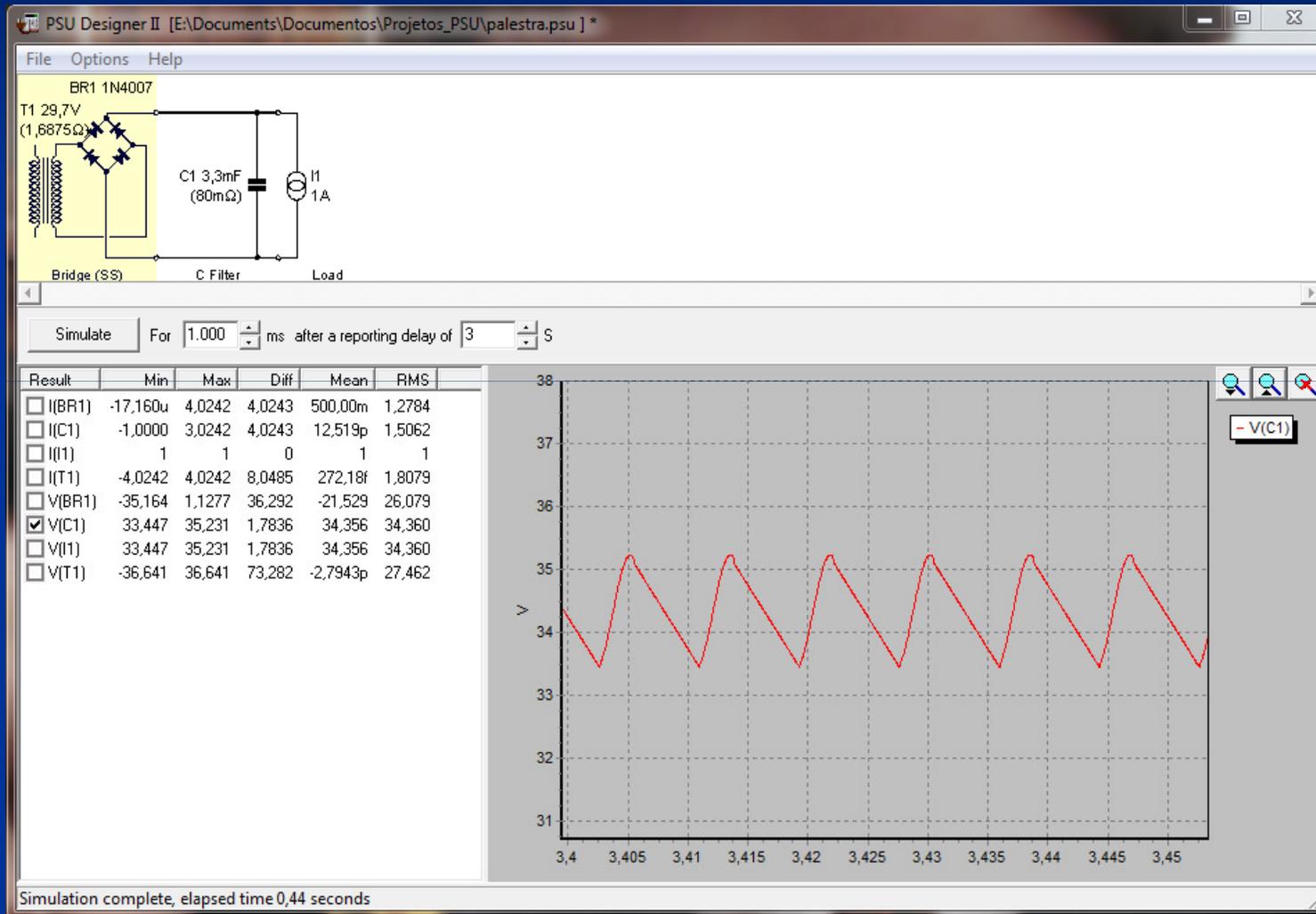
Results

Off-load voltage VAC RMS

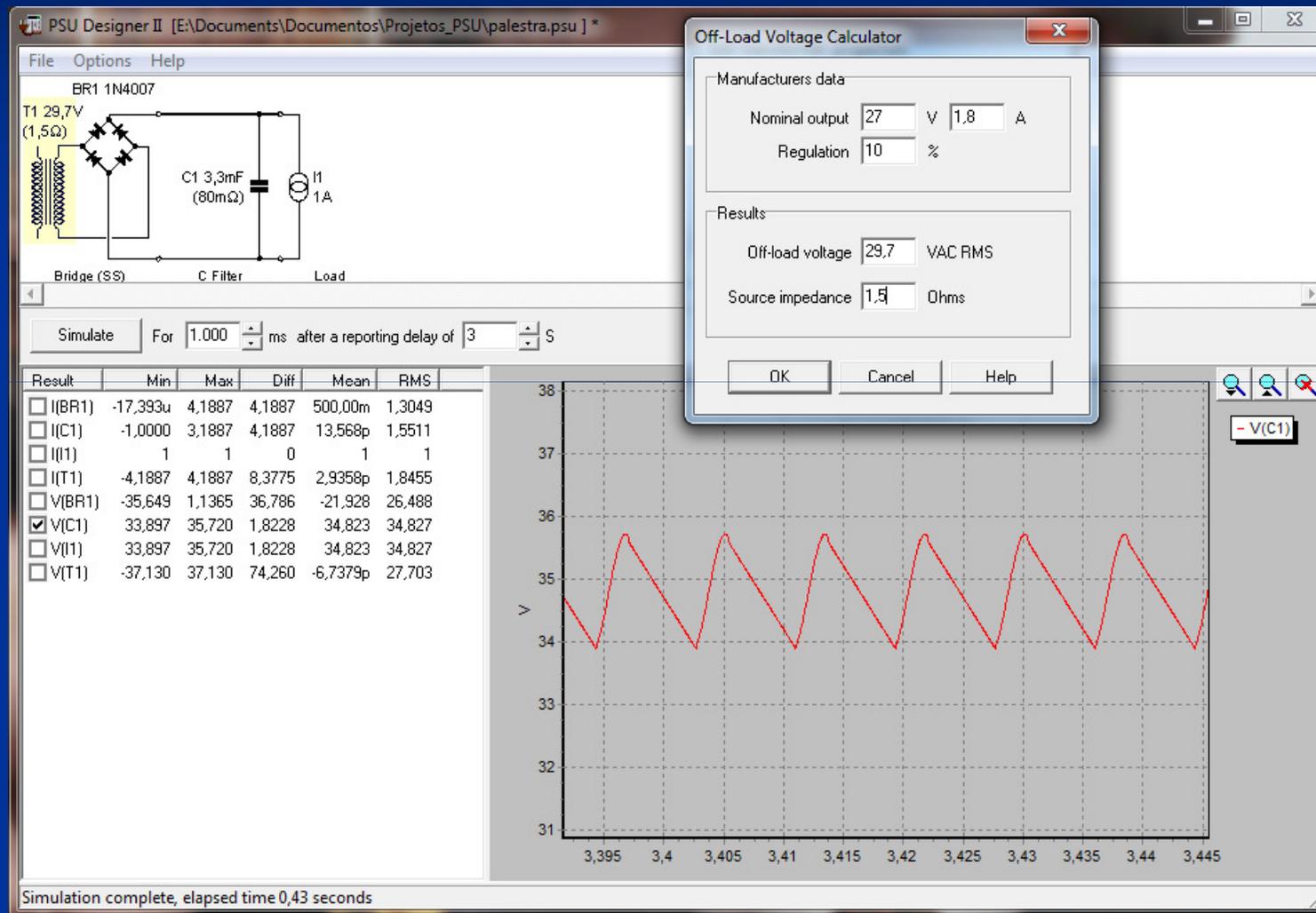
Source impedance Ohms

OK Cancel Help

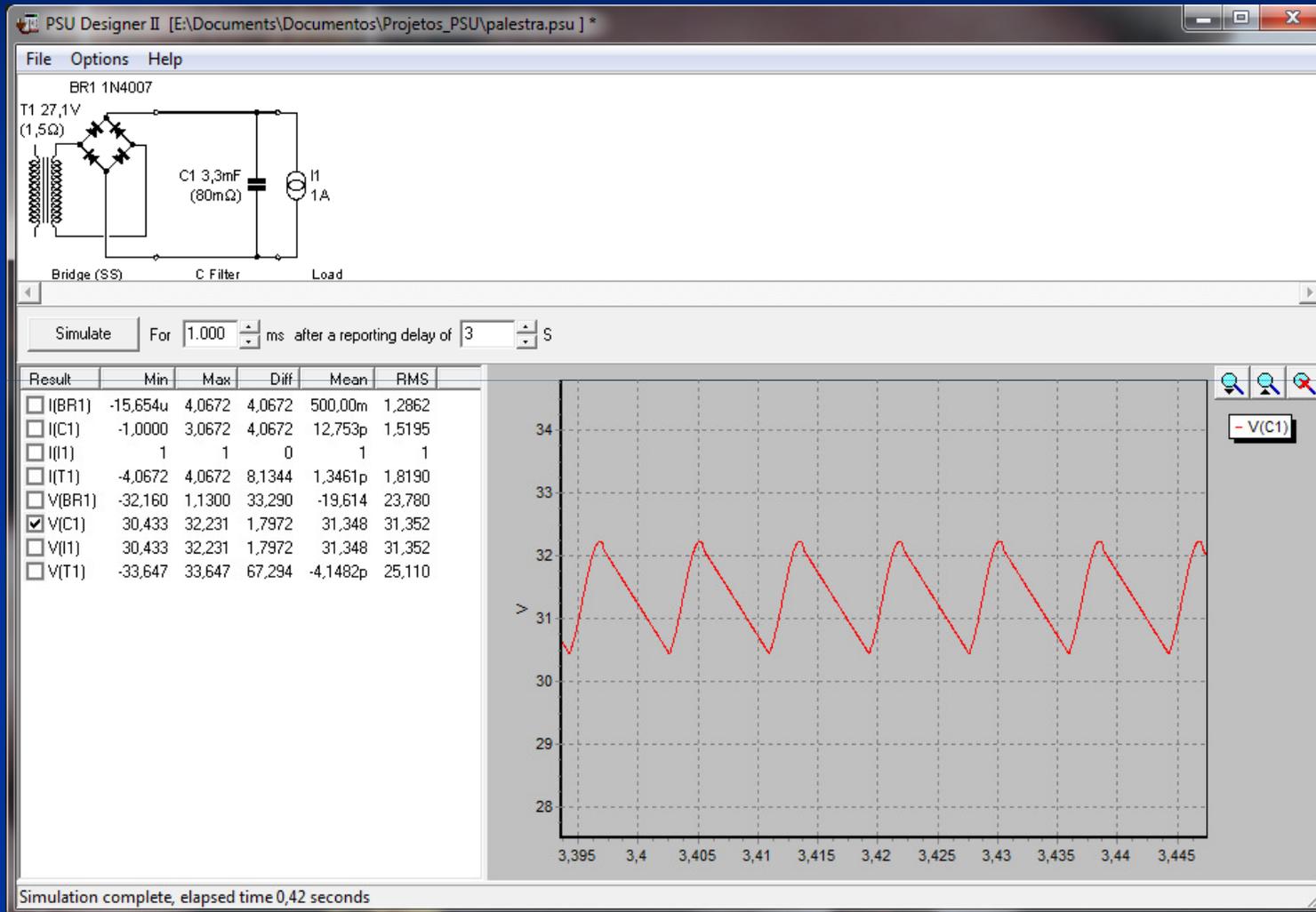
Projeto – Resultados com 220 V



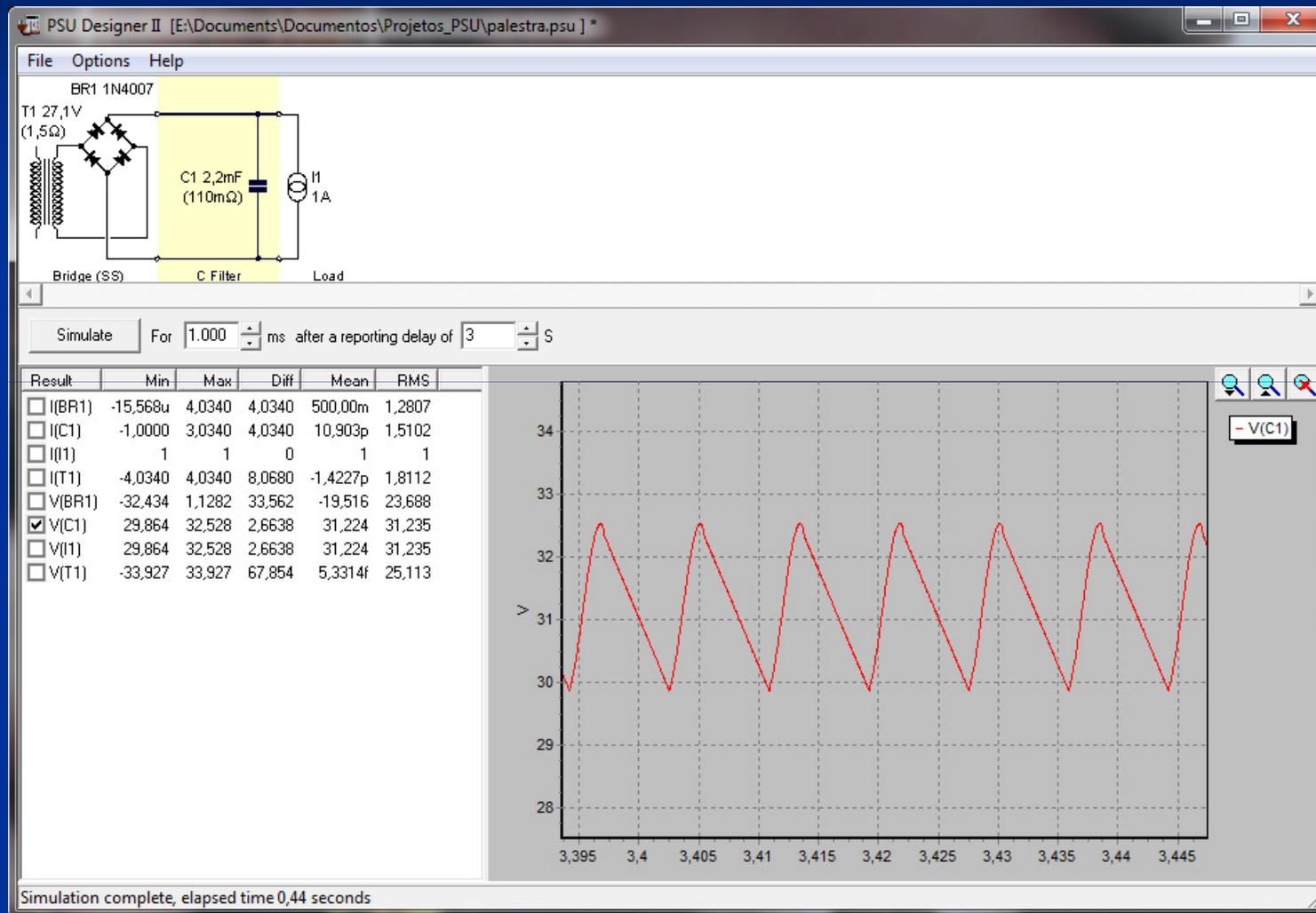
Projeto – Acertando I(T1)



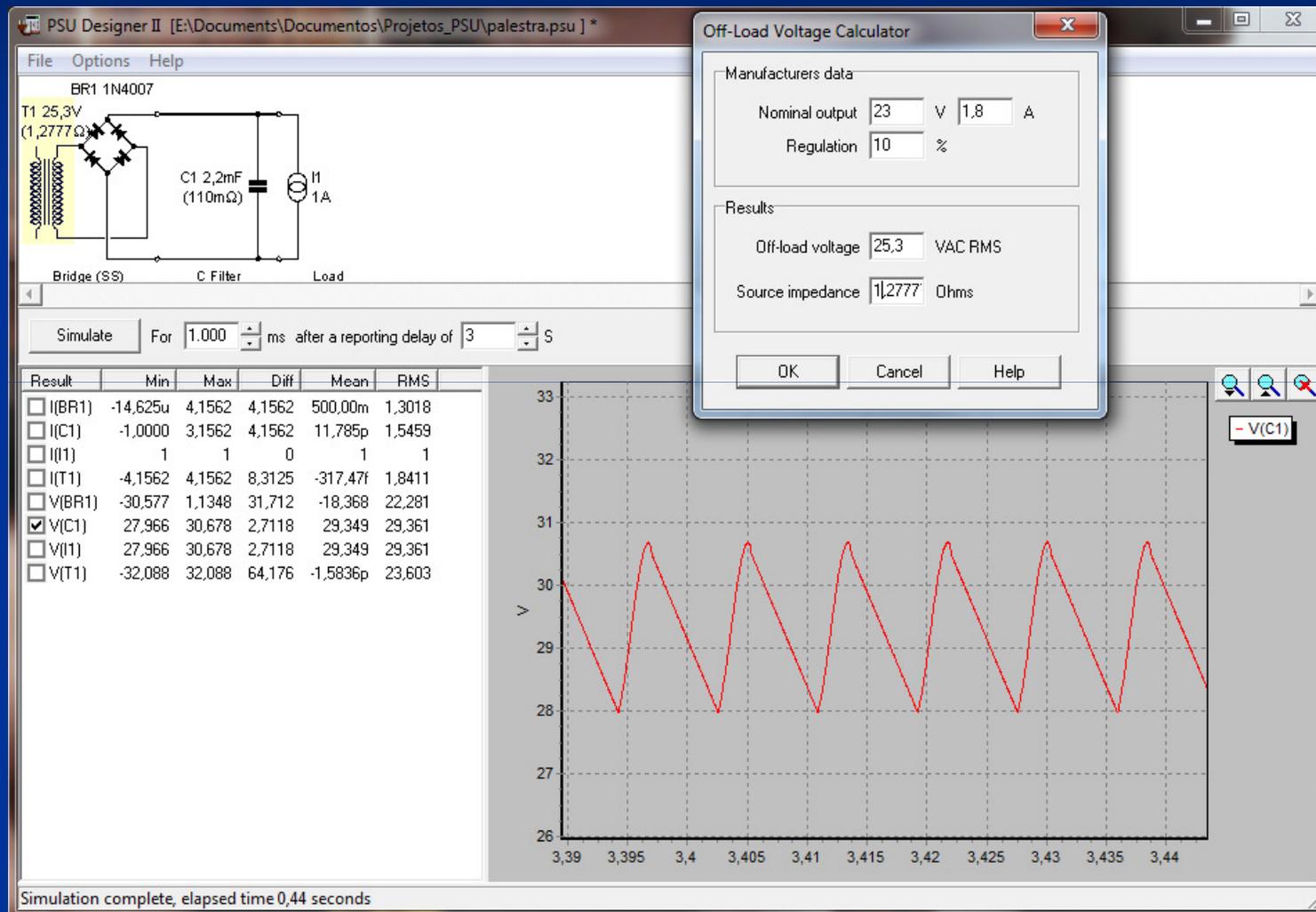
Projeto – Resultados com 201 V



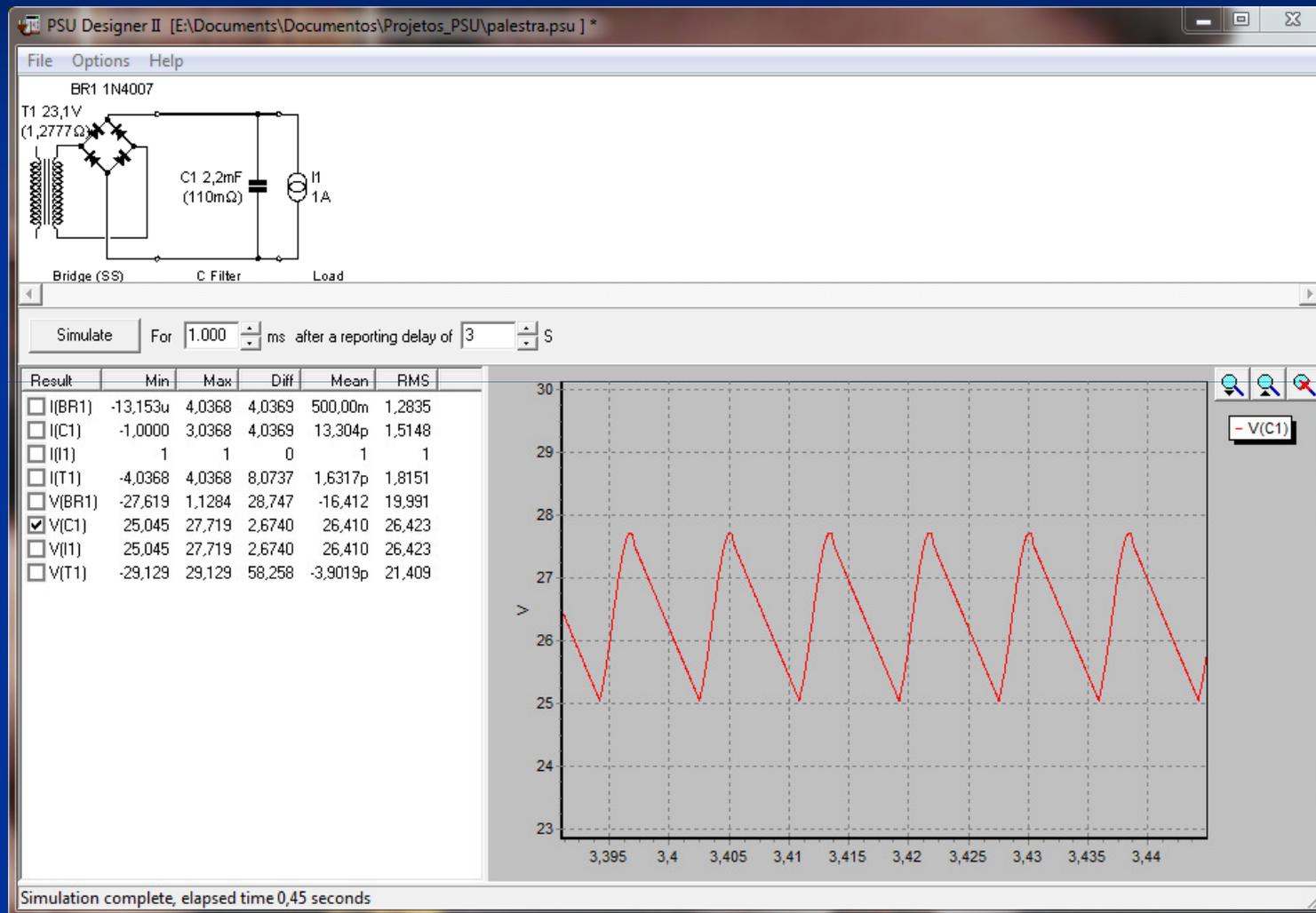
Projeto – Acertando a Ondulação a 201 V



Projeto – Acertando V(T1) a 220 V



Projeto – Conferindo V_{DC_MIN} a 201 V



Projeto – Simulador SPICE I

- SPICE - Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis.
- Desenvolvido na Universidade da Califórnia – Berkeley, 1973.
- Componentes são descritos por um modelo, especialmente os semicondutores.

“ O modelo contém equações, parâmetros e variáveis, os quais, trabalhando juntos, visam descrever, tão precisamente quanto possível, as características elétricas de um dispositivo real. “

- O modelo do diodo semiconductor utiliza 14 parâmetros :

Name	Parameter	Default value	Typical value	Units
IS	Saturation Current	10.0 f	50.0 f	A
RS	Ohmic Resistance	0	2.0	ohm
N	Emission Coefficient	1.0	1.1	
TT	Forward Transit Time	0	10.0 n	sec
CJO	Zero-bias Junction Capacitance	0	10.0 p	F
VJ	Contact Potential	1.0	0.8	V
M	Junction Capacitance Grading Exponent	0.5	0.3	
EG	Energy Gap	1.11	1.11	eV
XTI	IS Temperature Exponent	3.0	3.0	
KF	Flicker Noise Coefficient	0	0.1f	
AF	Flicker Noise Exponent	1.0	1.0	
FC	CJ Forward-bias Coefficient	0.5	0.5	
BV	Reverse Breakdown	∞	100.0	V
IBV	Current at BV	1.0 m	200.0 p	A

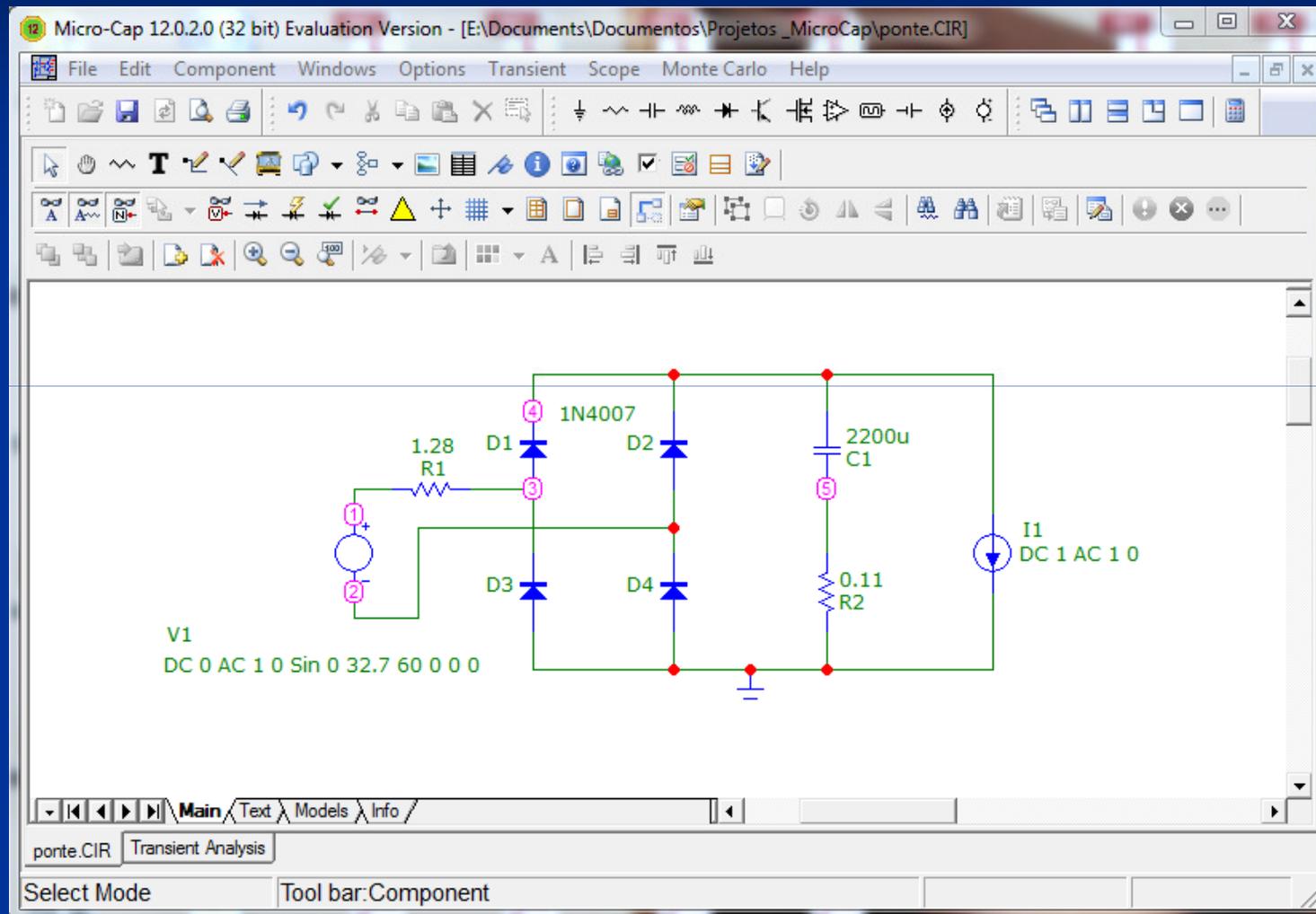
Projeto – Simulador SPICE II

- O modelo do diodo 1N4007 pode ser obtido de um dos fabricantes (ONSEMI)

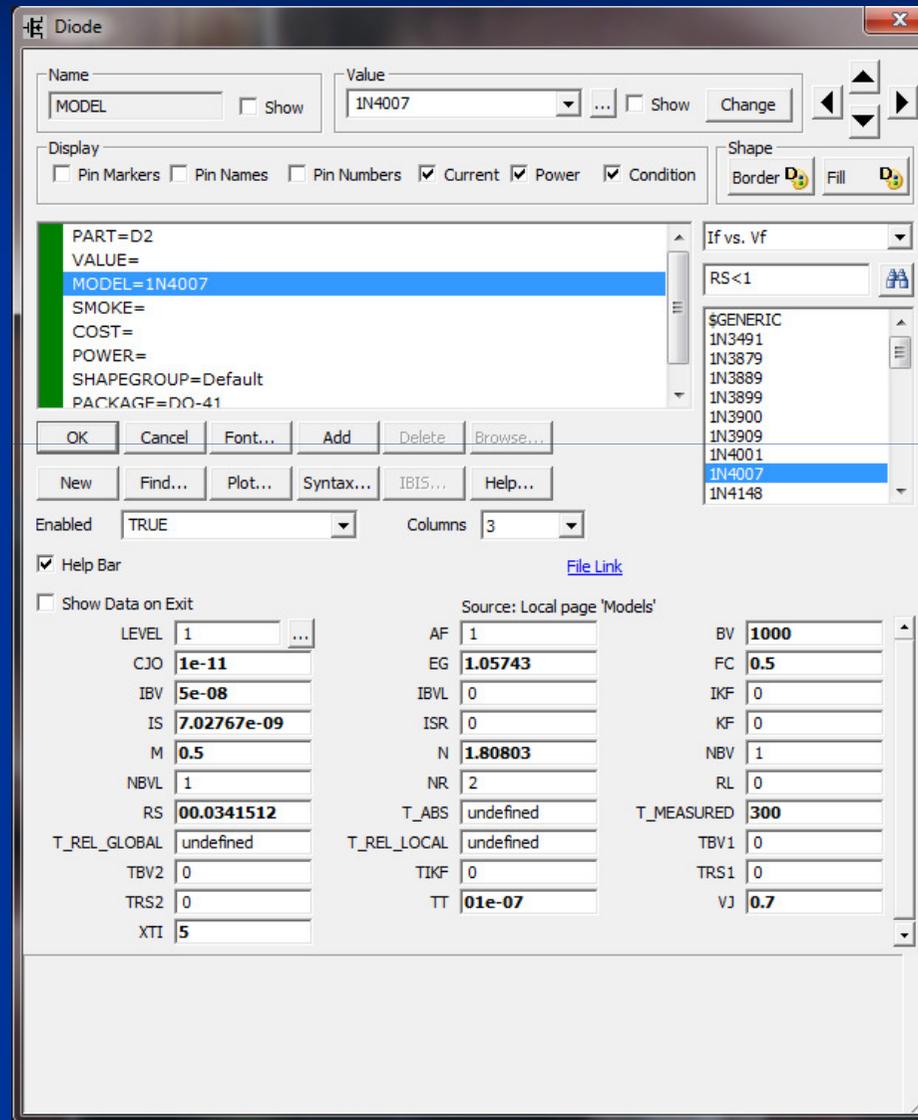
```
* MODEL FORMAT: SPICE2
.MODEL 1n4007 d
IS=7.02767e-09  RS=0.0341512  N=1.80803
EG=1.05743     XTI=5         BV=1000
IBV=5e-08     CJO=1e-11      VJ=0.7
M=0.5         FC=0.5       TT=1e-07
KF=0          AF=1
```

- Micro-Cap V. 12.
- Simulador comercial (pago) mas tem versão grátis para “ avaliação “.
- Transformador é substituído por uma fonte AC com $V_A = V_{PICO}$ a vazio, em série com a resistência R_T .
 - Para $V_2 = 23$ V, $V_A = 32,7$ V a 201 V; 35,8 V a 220 V; 37,6 V a 231 V.

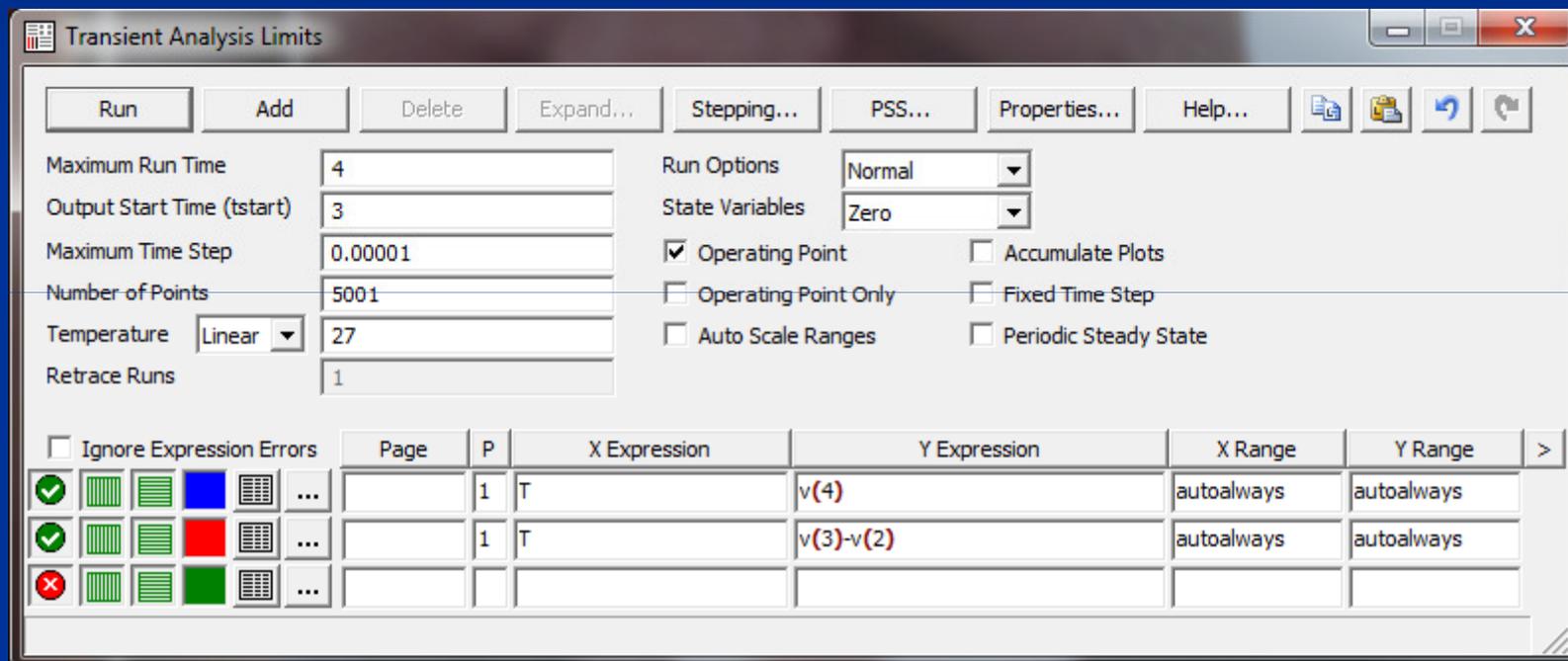
Projeto – Compondo o Circuito – 201 V



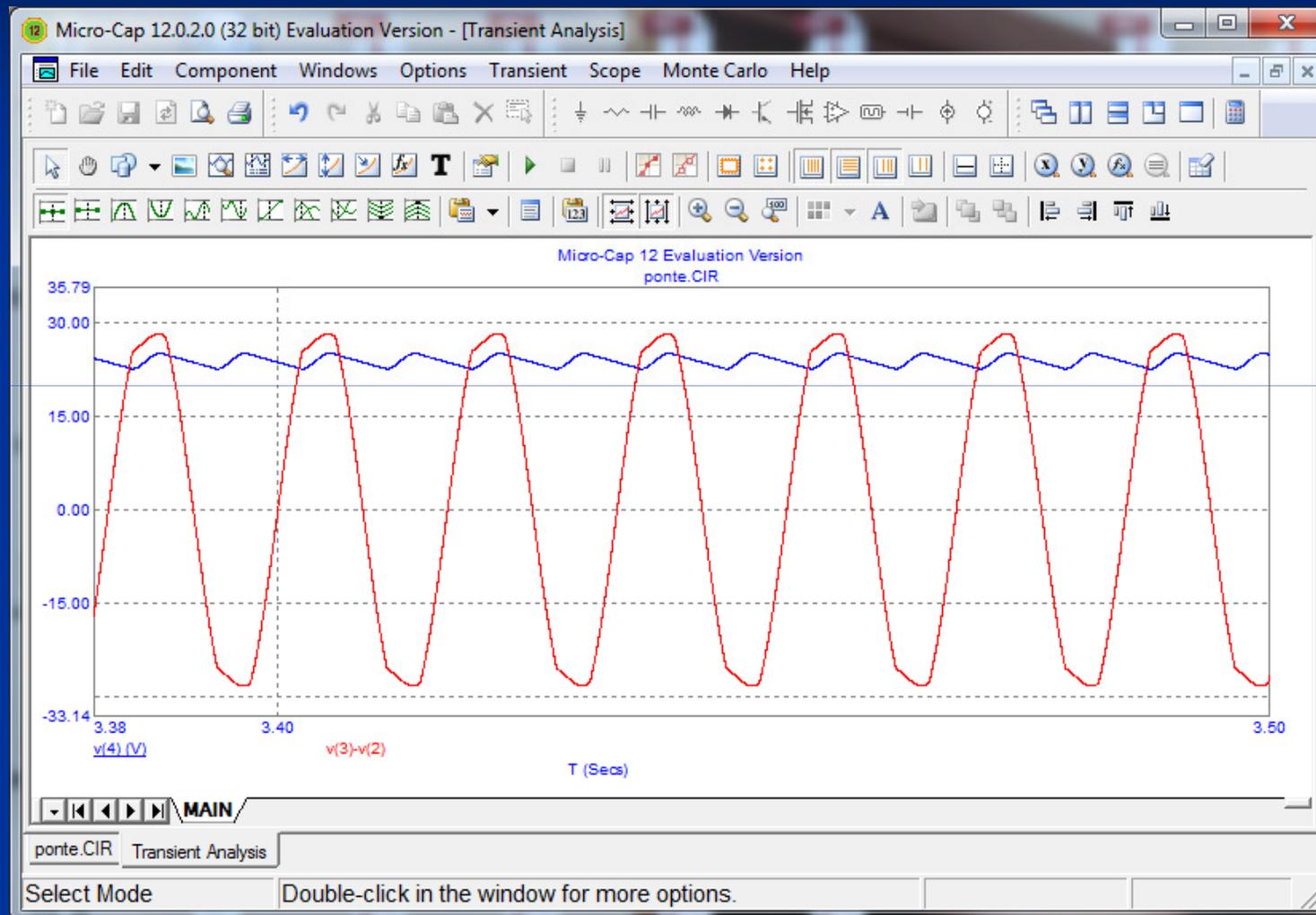
Projeto – Definindo o Diodo



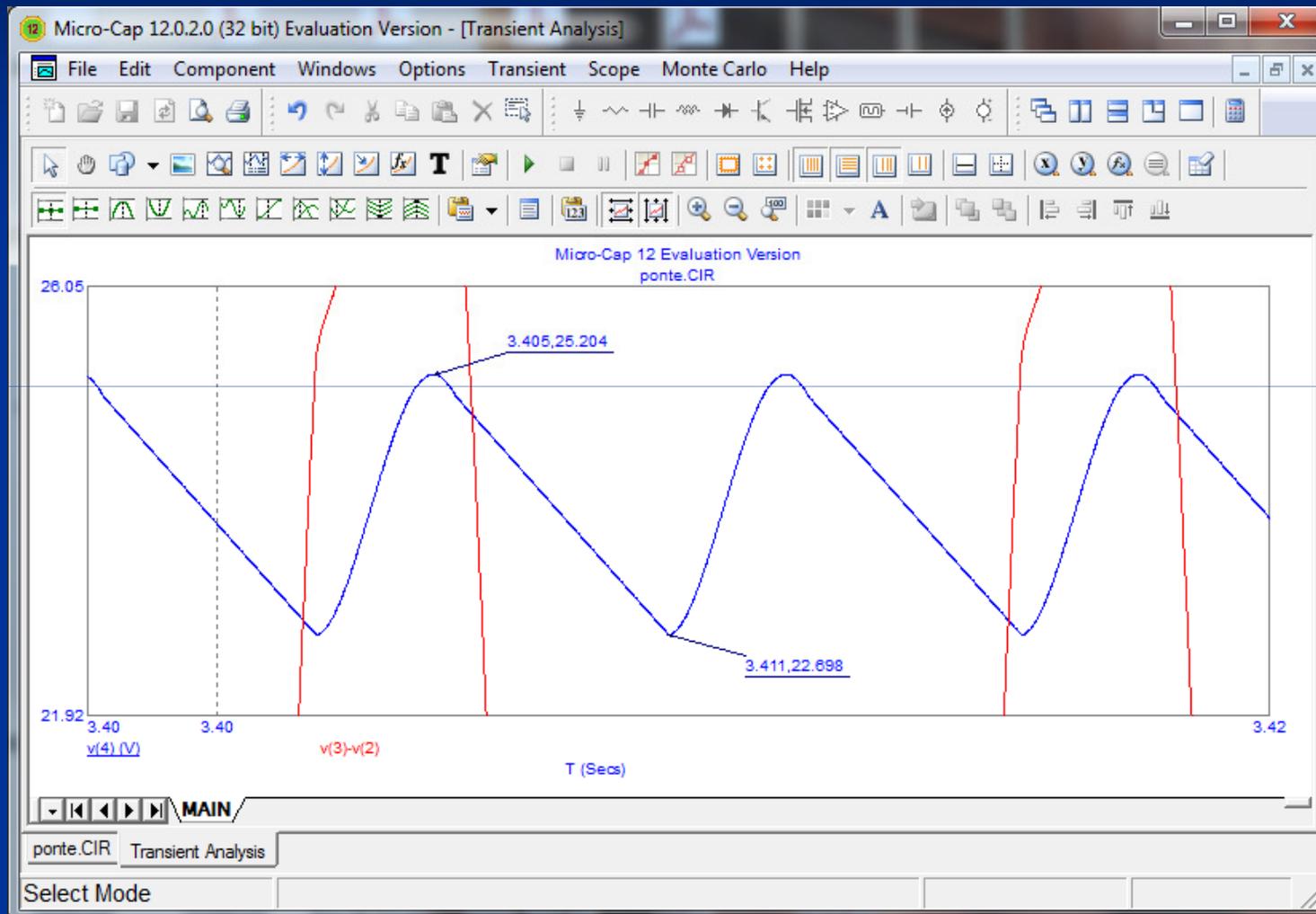
Projeto – Configurando a Simulação



Projeto – Verificando o Resultado



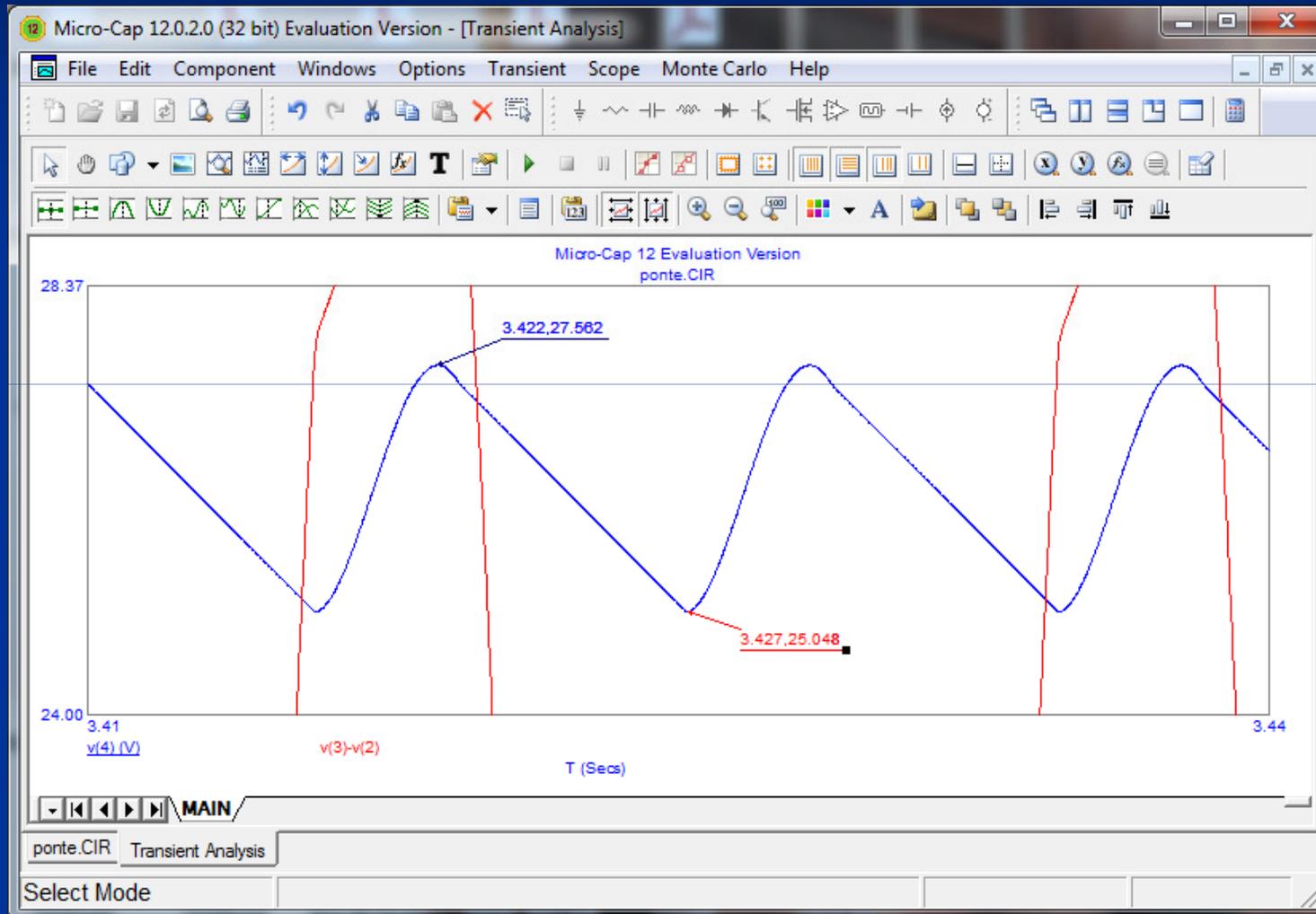
Projeto – Algo Não Deu Certo !



Projeto – Corrigindo o Transformador

- O PSU II dá como resultado uma tensão DC acima do valor real (2 a 3 V).
- No presente caso, a diferença em V_{DC_MIN} é de 2,3 V.
- Corrige-se a tensão secundária do transformador para $23 + 2,3 / 1,4 \sim 25$ V.
- As tensões VA a serem usadas nas simulações resultam :
 - 35,5 V a 210 V;
 - 38,9 V a 220 V;
 - 40,8 V a 231 V.

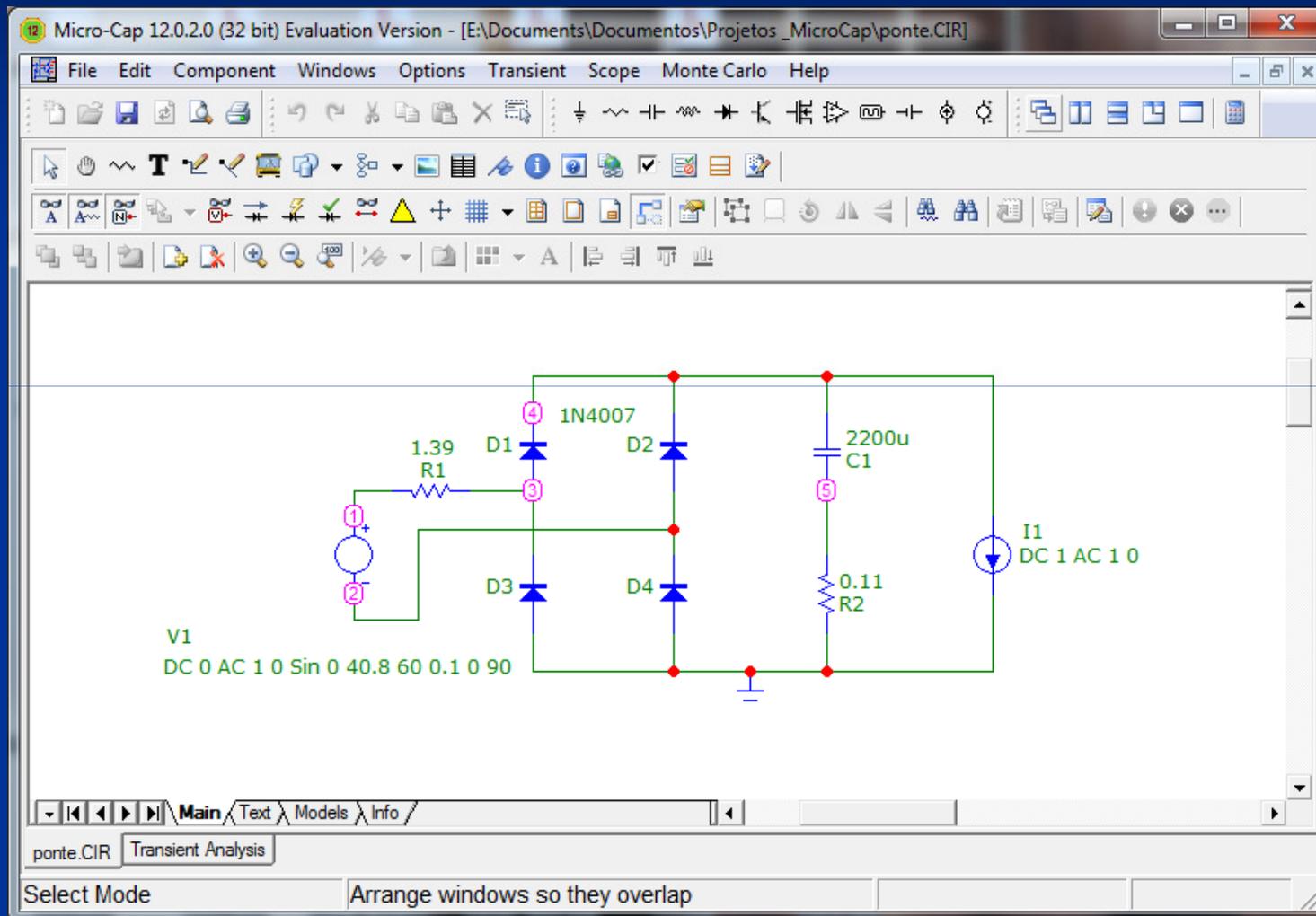
Projeto – Agora, Sim !



Projeto – Leitura das Correntes

- O simulador SPICE somente fornece o gráfico da corrente em fontes de tensão.
- Para a leitura das correntes máximas, $V_A = 40,8 \text{ V}$ (231 V).
- A corrente do transformador é obtida como $\text{rms}(I(V1))$.
- A corrente no capacitor eletrolítico é obtida calculando-se a corrente em R2 (R_{SE}) através de $\text{rms}(V(5))/0.11$.
- Para mascarar o transitório inicial, a medição das correntes eficazes é feita 1,0 s após o início da simulação.
- O simulador permite que se determine a corrente de surto máxima nos diodos. Para isso, ajustar em V1:
 - TD para um atraso de 0,1 s.
 - PH para 90° (tensão senoidal iniciando no pico).

Projeto – Leitura das Correntes - Circuito



Projeto – Leitura das Correntes - Configuração

Transient Analysis Limits

Run Add Delete Expand... Stepping... PSS... Properties... Help...

Maximum Run Time: 2
Output Start Time (tstart): 0
Maximum Time Step: 0.00001
Number of Points: 5001
Temperature: Linear 27
Retrace Runs: 1

Run Options: Normal
State Variables: Zero

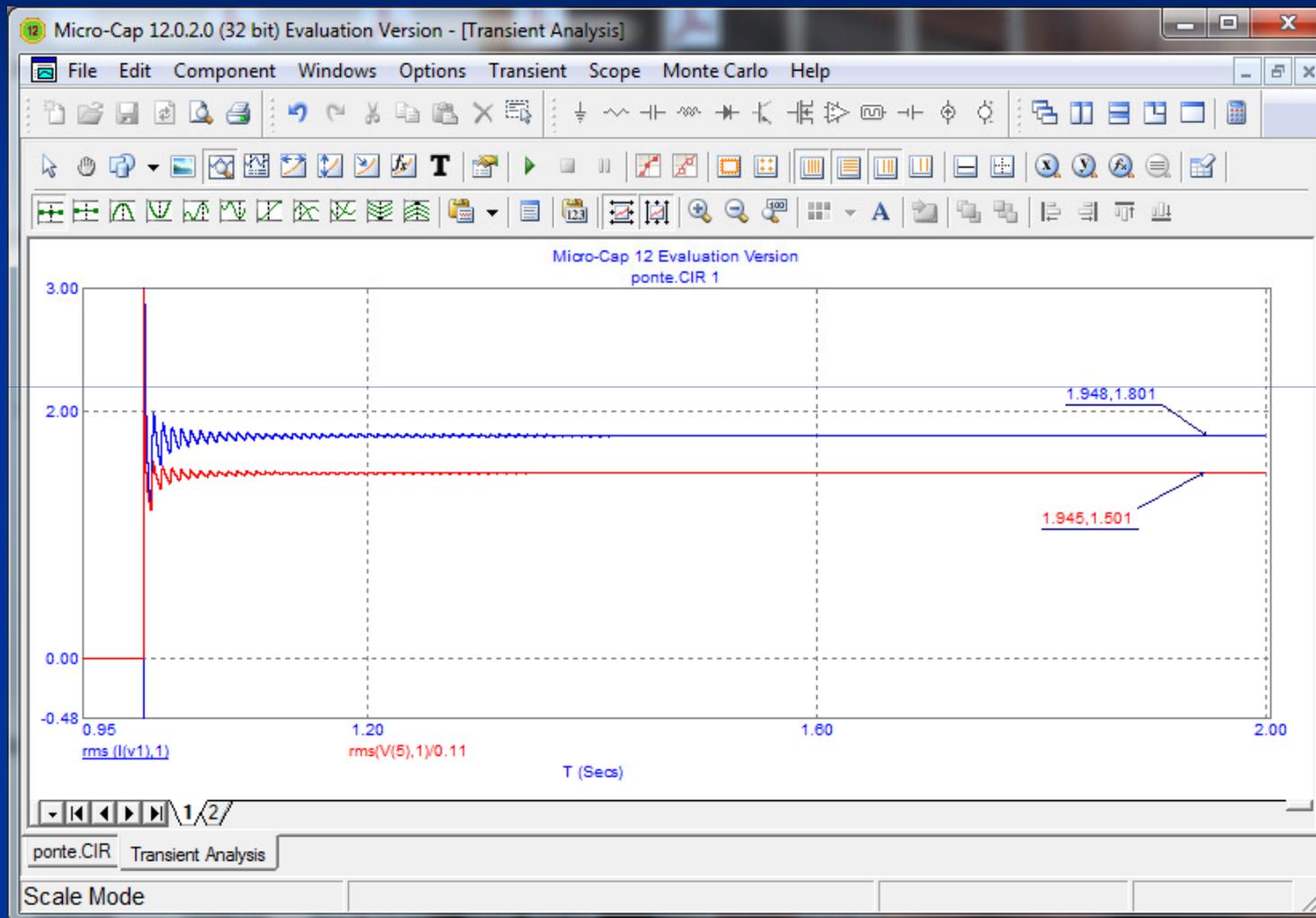
Operating Point Accumulate Plots
 Operating Point Only Fixed Time Step
 Auto Scale Ranges Periodic Steady State

Ignore Expression Errors

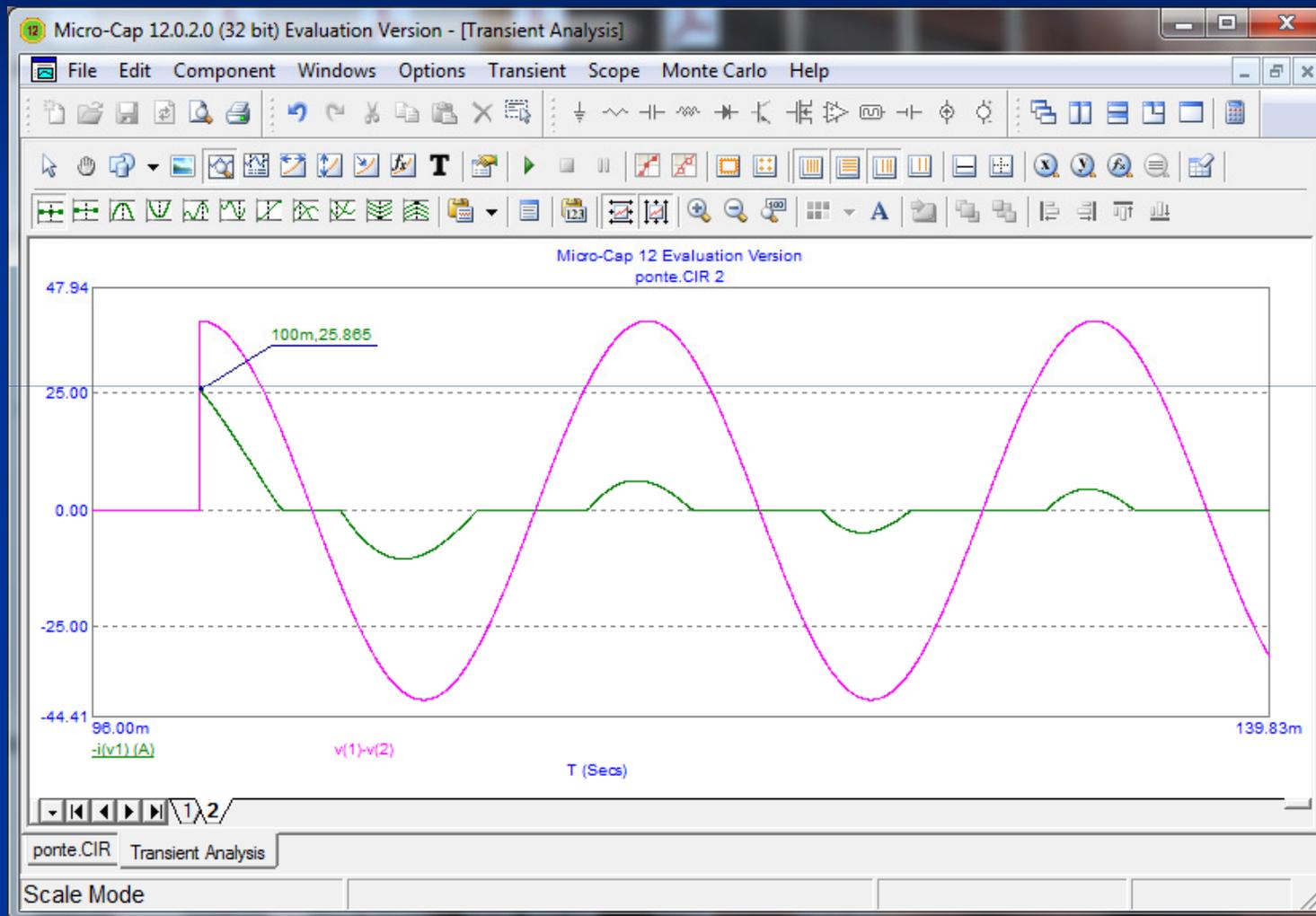
	Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range	>
<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	T	rms(I(v1),1)	autoalways	autoalways	
<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	T	rms(V(5),1)/0.11	autoalways	autoalways	
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2	T	-i(v1)	autoalways	autoalways	
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2	T	v(1)-v(2)	autoalways	autoalways	

Runs the analysis.

Projeto – Correntes Eficazes



Projeto – Corrente de Surto Máxima



Projeto – Resultados Finais

	PSU II	Micro-Cap
Transformador (regulação : 10%)	23 V 1,8 A	25 V 1,8 A
V_dc_max a 231 V, 1 mA	36,1 V	38,2 V
V_dc_min a 201 V, 1 A	25,0 V	25,0 V
Capacitor de filtro	2200 uF 50 V	2200 uF 50 V
Corrente eficaz no capacitor	max 1,56 A	max 1,50 A
Ondulação em V_dc	max 2,73 V_pp	2,58 V_PP
	min 2,67 V_pp	2,51 V_pp
Corrente de surto máxima nos diodos	29 A	26 A

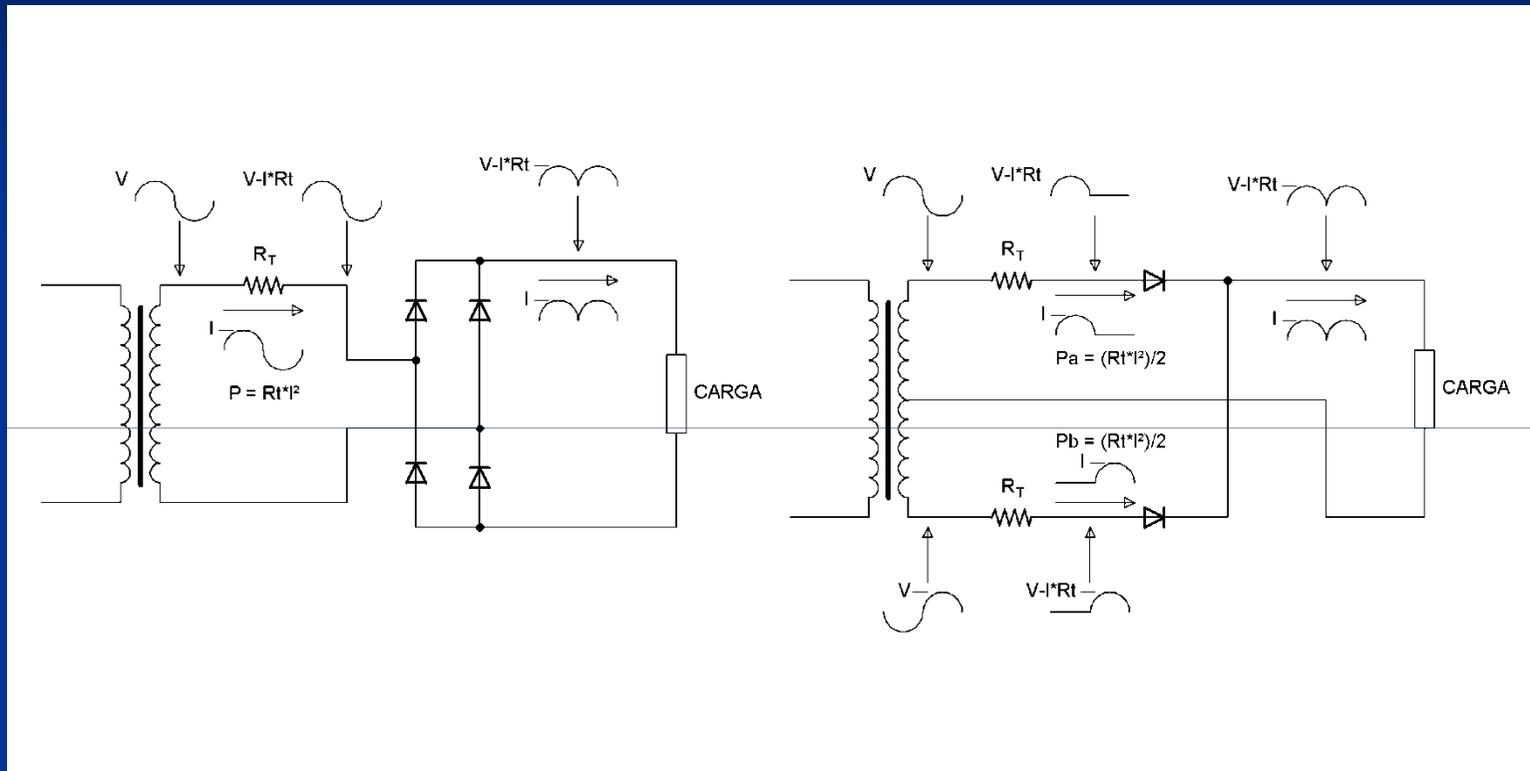
Boas Práticas de Projeto

- Impor uma razoável margem de segurança para a tensão V_{DC_MIN} :
 - Verificar cuidadosamente quanto é exigido de tensão sobre o regulador para que esse mantenha a regulação da tensão de saída, acrescentando pelo menos 1,0 V para levar em conta variações devidas ao transformador, diodos, capacitor eletrolítico e efeitos da temperatura;
 - Considerar uma tensão mínima da rede 2 a 3 V abaixo do mínimo informado.
- Estabelecer uma vida útil mínima de 50000 h para o capacitor de filtro tomando como base para o funcionamento, 8 h / dia de uso diário.
- Para máximo rendimento e economia, especificar o transformador de acordo com os resultados obtidos. Transformadores de boa qualidade são feitos para operar permanentemente sob potência máxima.
- Verificar junto ao fabricante de transformadores qual é a regulação mais adequada, em função da potência a ser convertida.

Retificador de Onda Completa

- A opção em usar um retificador de onda completa em lugar de um retificador em ponte deve ser feita com cuidado :
 - O retificador em onda completa exige um transformador maior (mas com tensão um pouco menor) em contrapartida ao benefício de usar apenas dois diodos;
 - Pode ser uma opção para retificadores de alta corrente e baixa tensão, no qual a economia com a redução no número de diodos (componentes + dissipadores + refrigeração) compense o custo do transformador maior.
- A retificação em onda completa não faz mágica :
 - Não soma as correntes das duas metades do secundário;
 - Não permite diminuir a bitola do fio secundário em função da menor corrente eficaz em cada uma das metades do secundário.

Onda Completa x Ponte



- R_T precisa ser igual nos dois retificadores para que ambos operem de forma equivalente.

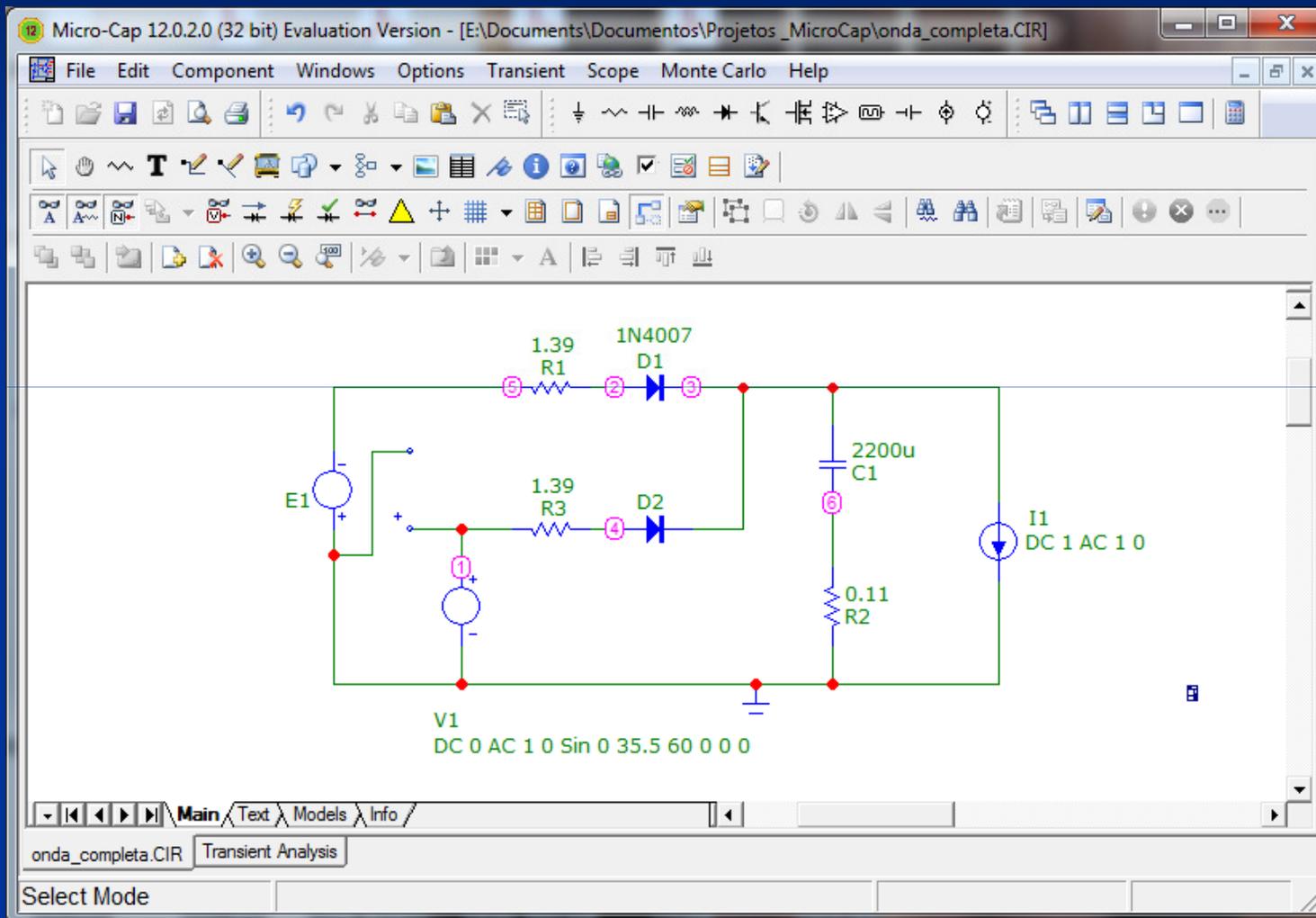
Onda Completa no PSU II

The screenshot displays the PSU Designer II interface. At the top, a menu bar includes 'File', 'Options', and 'Help'. The main workspace shows a circuit diagram with a transformer (T1, 23,1V, 1,2777Ω), a bridge rectifier (D1, 1N4007), a capacitor filter (C1, 2,2mF, 110mΩ), and a load (I1, 1A). A dialog box titled 'Select type of source' is open, showing options for 'Solid State' and 'Vacuum Tube', each with sub-options for 'Half wave', 'Full wave', 'Bridge', and 'Voltage doubler'. The 'Full wave' option under 'Solid State' is selected. Below the circuit, a 'Simulate' button is visible, along with settings for simulation duration (1.000 ms) and reporting delay (3 s). A table of simulation results is shown, and a waveform plot displays the output voltage V(C1) as a full-wave rectified sine wave.

Result	Min	Max	Diff	Mean	RMS
<input type="checkbox"/> I(C1)	-1,0000	2,9688	3,9688	11,762p	1,4813
<input type="checkbox"/> I(D1)	-26,700u	3,9688	3,9688	500,00m	1,2638
<input type="checkbox"/> I(I1)	1	1	0	1	1
<input type="checkbox"/> I(T1)	-26,700u	3,9688	3,9688	500,00m	1,2638
<input checked="" type="checkbox"/> V(C1)	25,459	28,068	2,6087	26,798	26,810
<input type="checkbox"/> V(D1)	-64,209	1,1247	65,333	-27,878	36,249
<input type="checkbox"/> V(I1)	25,459	28,068	2,6087	26,798	26,810
<input type="checkbox"/> V(T1)	-28,712	28,712	57,424	-4,5213p	21,409

Simulation complete, elapsed time 0,42 seconds

Onda Completa no Micro-Cap



FIM

Bibliografia

- Gray, T. S., “Applied Electronics” 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1953.
- Grossner, N. R., “Transformers for Electronic Circuits”, McGraw-Hill Book Co., New York, 1967.
- Lee, R., “ Electronic Transformers and Circuits”, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1955.
- Martin Jr., T. L., “Electronic Circuits”, Prentice-Hall, Inc. , Englewood Cliffs, 1955.
- Lieders, A. “Circuitos Retificadores Monofásicos Com Filtros RC”, Nova Eletrônica n°s 38/39, 1980.
- Semiconductor Components Industries, LLC (ON Semiconductor), “Rectifier Application Handbook” rev. 2, 2001.



Esta apresentação está disponível em
www.schatz.eng.br/textos.html

■ Transformadores

- Amplificadores HiFi
- Amplificadores para instrumentos musicais
- Modulação
- Para osciloscópio
- Réplicas de originais nacionais e importados



■ Indutores

- Choques de filtro
- Lineares
- Especiais



Regulação dos Transformadores Schatz

Valores máximos conforme a potência transformada, para operação permanente a plena carga:

- < 25 VA : 20%
- 25 VA ...50 VA : 15%
- 50 VA ...150 VA : 10 %
- 150 VA ...200 VA : 8%
- 200 VA ...250 VA : 5%
- 250 VA ...350 VA : 4,5%