

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Informática  
Departamento de Informática Aplicada  
MIC02 - PGMICRO

# Tutorial Construção e Simulação de um Inversor CMOS utilizando o Virtuoso

## (VERSÃO VERDE 10/09/2013)

Jorge Wichrowski Krieger de Mello

[jwkmhdr@hotmail.com](mailto:jwkmhdr@hotmail.com)

Prof. Sergio Bampi

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	3
OBJETIVOS.....	4
DESENVOLVIMENTO.....	5
PREPARANDO O AMBIENTE.....	5
CONSTRUINDO O ESQUEMÁTICO.....	6
CONSTRUINDO O SÍMBOLO.....	13
SIMULAÇÃO DC.....	16
1).....	16
SIMULAÇÃO TRANSIENTE.....	30
2).....	30
3).....	40
4).....	41
CONSTRUINDO O LAYOUT.....	42
VERIFICANDO O LAYOUT E EXTRAINDO OS PARASITAS.....	53
RESULTADOS FINAIS.....	61

## INTRODUÇÃO

Este tutorial descreve passo a passo como construir um inversor e extrair os resultados dele. Não estamos utilizando o método mais rápido para isso, pois queremos ter contato com todas as regras de desenho.

## OBJETIVOS

0 – Descrever detalhadamente como usei o Virtuoso, para que eu possa no futuro e em outros trabalhos poupar tempo. E também para que eu possa encontrar meus erros mais facilmente neste trabalho.

1- Função de transferência DC :  $V_{out}$  vs.  $V_{in}$  (curva). Margens de ruído High e Low, calculadas a partir da função de transferência DC.

2- Valores (em ps =  $10e-12$  s) dos tempos de resposta para o inversor projetado (para condições de carga tais que  $F_{an-In} = F_{an-out} = 1$ ), a saber:  $T_{phl}$ ,  $T_{plh}$ ,  $T_{rise}$  e  $T_{fall}$ .

3- Potência consumida pelo Inversor projetado, à frequência de chaveamento de  $F_o = 200$  MHz, utilizando o método explicado em a) , b) e c) abaixo.

4- Cálculo da energia média (em pJ) consumida por um (e apenas um) par de transições  $L \rightarrow H$  e  $H \rightarrow L$  por ciclo de clock.

### RESTRIÇÕES:

A altura centro a centro das linhas de VDD e GND deve ser  $14\mu$ .

As linhas de VDD e GND devem ter  $2\mu$ .

O transistor P deve ter 1,5x o tamanho do transistor N.

O L deve ser  $0.35\mu$

## DESENVOLVIMENTO

### PREPARANDO O AMBIENTE:

Possua o sistema operacional Linux instalado corretamente no computador, acesso a Internet e uma conta no instituto de informática da UFRGS:

Abra o terminal:

Digite as seguintes linhas de comandos (use o seu e-mail não o meu):

```
ssh -X jwkmello@portal.inf.ufrgs.br
```

É pedido a senha do instituto de informática. Uma vez logado precisa entrar no servidor do nscad:

```
ssh -X jwkmello@ufrgs-server-09.inf.ufrgs.br
```

É pedido a senha da conta na nscad.

A primeira vez crie a seguinte pasta:

```
mkdir project.WA
```

Execute os próximos comandos:

```
cd project.WA
```

```
ssh
```

```
source /scripts/start_ams_hk410.csh
```

A primeira vez execute o virtuoso assim:

```
ams_cds -tech c35b4
```

Na próxima vez que executar o virtuoso será necessário apenas digitar o seguinte comando:

```
ams_cds
```

**OBS: na primeira janela quando se abre a primeira vez deve ser escolhida a opção C35B4CO PIP.**

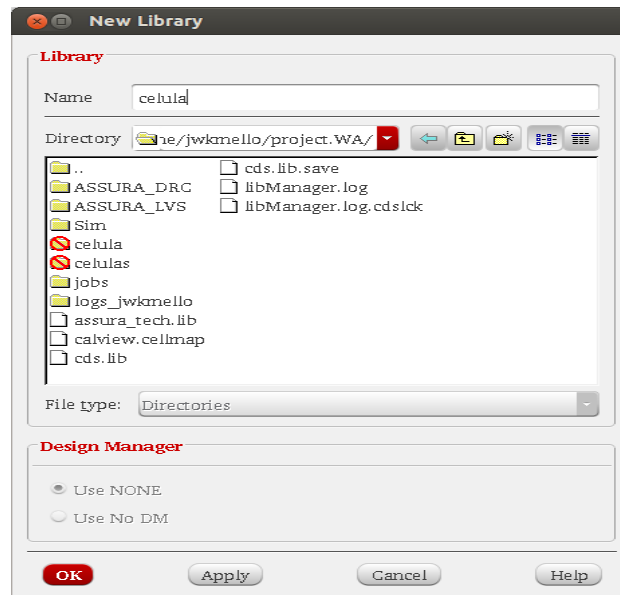
## CONSTRUINDO O ESQUEMÁTICO:

Quando iniciar o Virtuoso pela primeira vez vai abrir uma janela apenas clique **OK**.

Procure uma janela chamada **Library Manager**. Se ela não estiver aberta vá no console principal **CIW** e clique em **Tools** e ali terá o **Library Manager**.

Crie uma biblioteca com um nome qualquer, escolhi “**celulas**”:

**File** → **New** → **Library...**

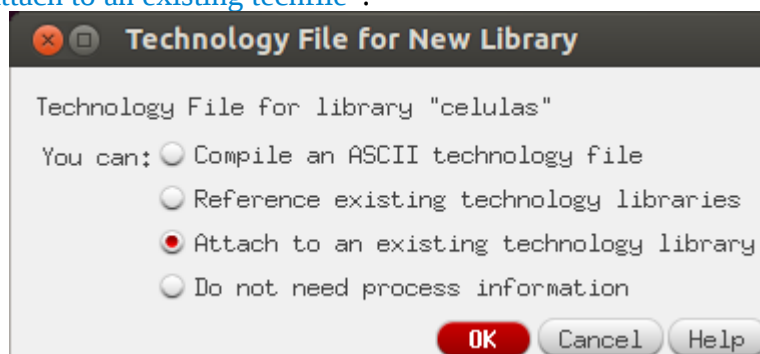


Clique em:

**OK**

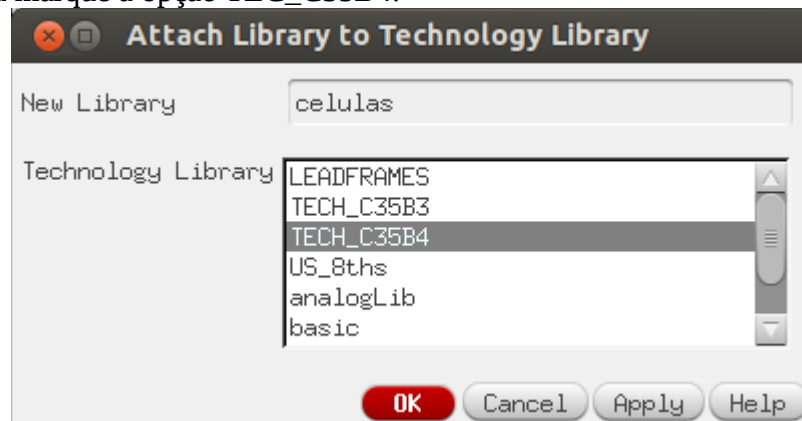
Apareceu a seguinte janela:

Marque a opção “**Attach to an existing techfile**”:



**OK**

Na próxima janela marque a opção TEC\_C35B4:



Ok

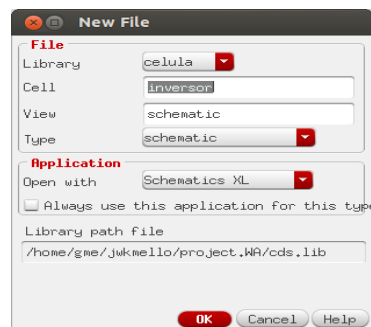
Agora feito isso podemos criar nossa célula, primeiro selecione a biblioteca “celulas” clicando em cima dela no “Library Manager”. Depois no menu e faça o seguinte:

File → New → Cell View ...

Primeiro devemos criar o esquemático para o inversor. Em “Cell” dei o nome de “inversor”.

Em “Type” selecione “schematic”.

Em “Open with” selecione “Schematics XL”.



Uma tela preta para edição foi aberta. Então clique:

Create → Instance

Clique em:

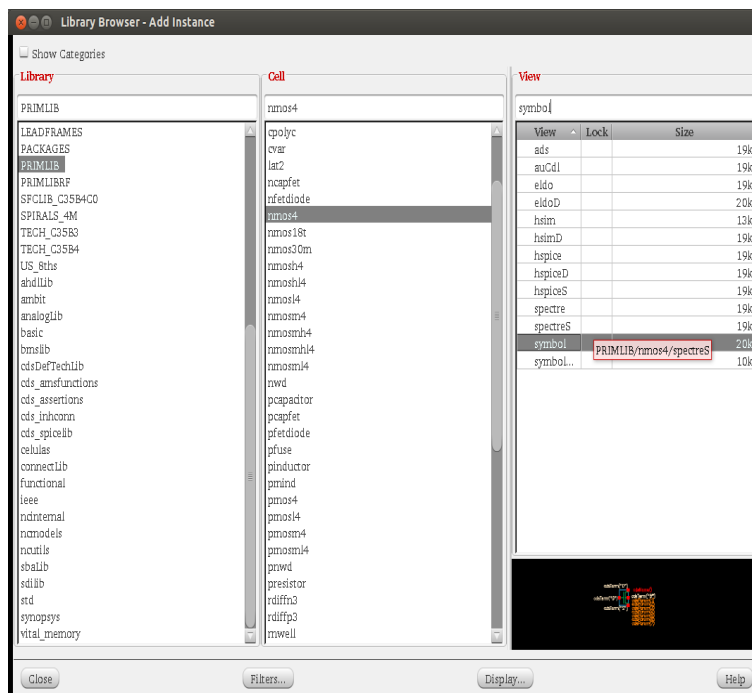
Browse

Nos List Boxes escolha as opções:

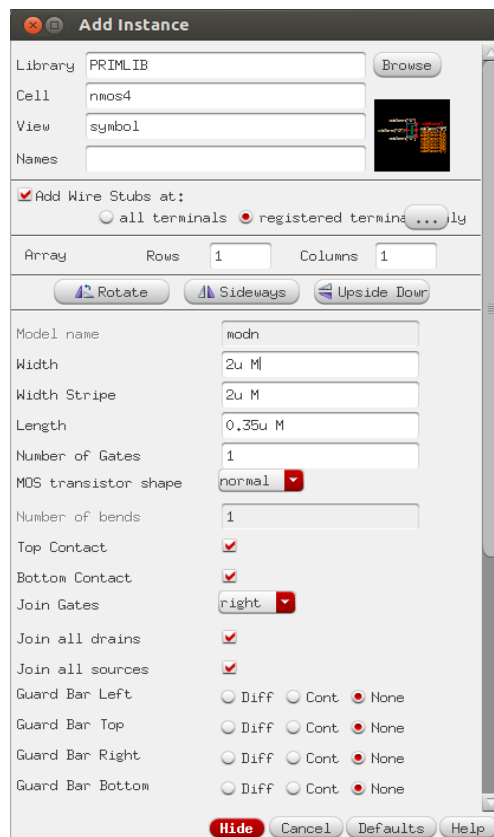
PRIMLIB

nmos4

Symbol



Mude o “Width” do transistor para 2u (ESCOLHA O SEU TAMANHO, ESTA NÃO É A MELHOR).



OBS: para editar depois uma instância já colocada no esquemático, basta selecionar ela e clicar q.

Clique na tela aonde queira por transistor.

Clique em **Hide** para fechar as janelas.

Faça o mesmo para o pmos4. Escolhendo o **“Width”** maior , 3u. (wp = 1,5 wn, LEMBRO QUE 3u NÃO É O TAMANHO QUE TERÁ OS MELHORES RESULTADOS)

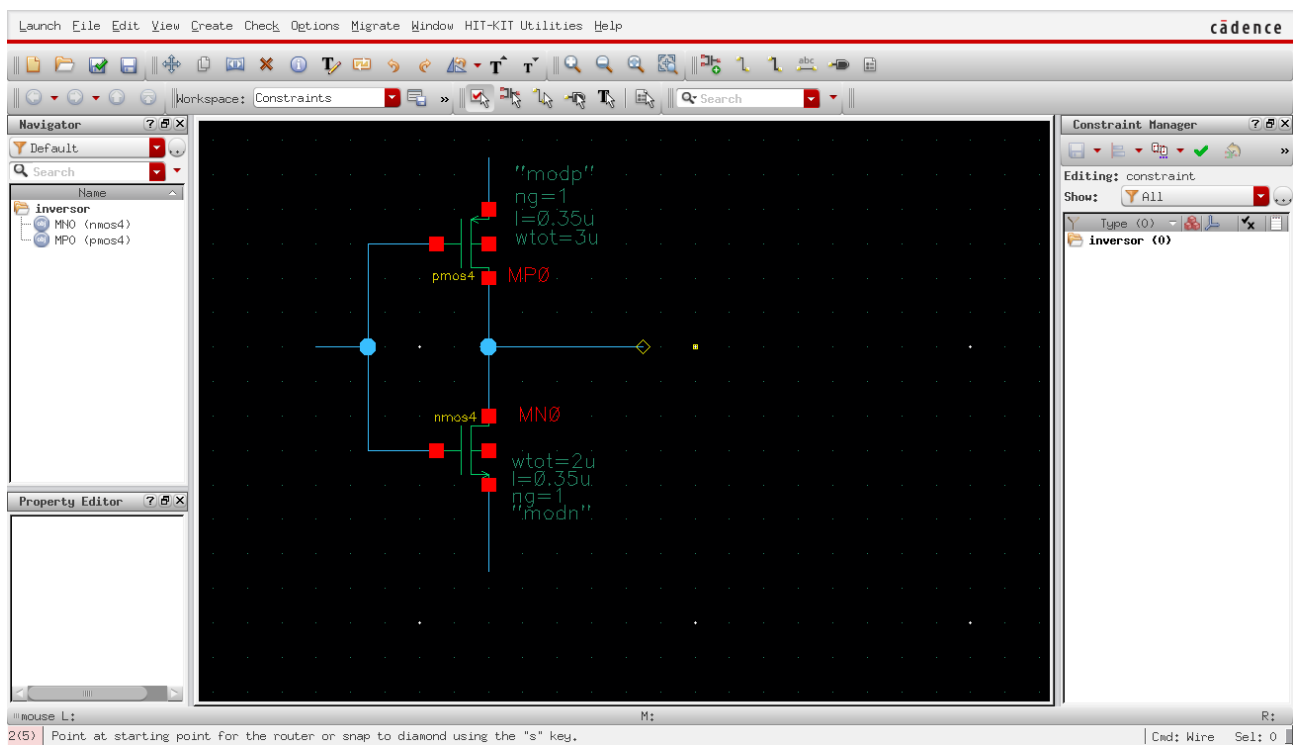
Após isso faça as ligações que existem entre esses dois transistores utilizando a opção **“Create → Wire(Narrow)”**, clique no local onde começa o fio, arraste o mouse até o local desejado e dê dois cliques para soltar o fio.

\*\*\*\*\*DICAS\*\*\*\*\*

\*Quando não estiver conseguindo fazer algo, experimente digitar algumas vezes a tecla **ESC**, pois assim o comando que você esta utilizando erroneamente é cancelado.

\*Para apagar pressione **Delete** e clique com o mouse sobre a instancia ou fio que deseja apagar.

\*\*\*\*\*DICAS\*\*\*\*\*



**\*\*DICA\*\***

O cursor do mouse muda quando uma função está ativa. Fique atento para não fazer coisas indesejadas.

Agora falta adicionar os pinos de VDD, GND , IN , OUT

Create → Pin

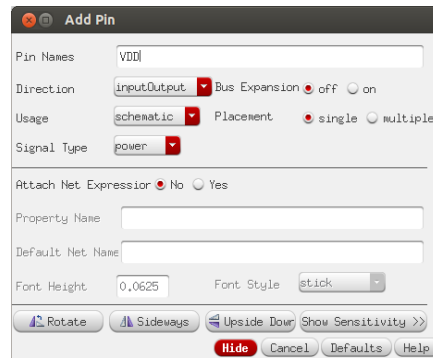
Dê aos pinos os nomes utilizados acima, com letra maiúscula, em “Pin Names”.

VDD → Direction - “inputOutput”  
Signal Type - “power”

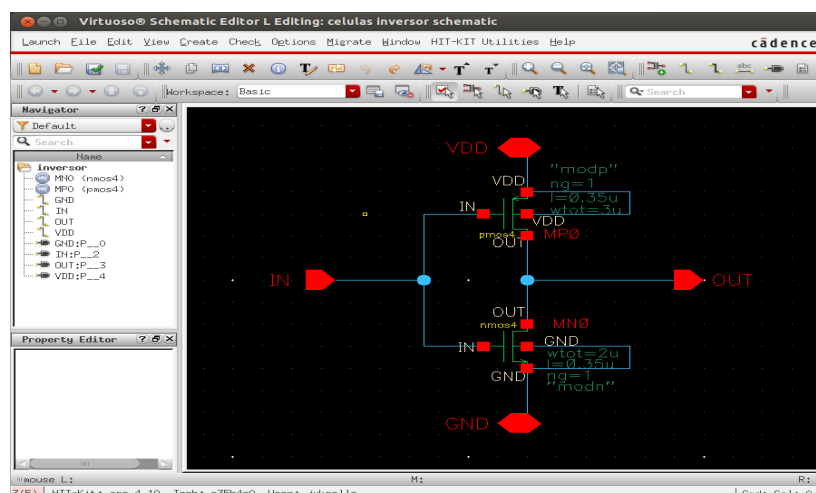
IN → Direction - “input”  
Signal Type - “signal”

OUT → Direction - “output”  
Signal Type - “signal”

GND → Direction - “inputOutput”  
Signal Type - “ground”



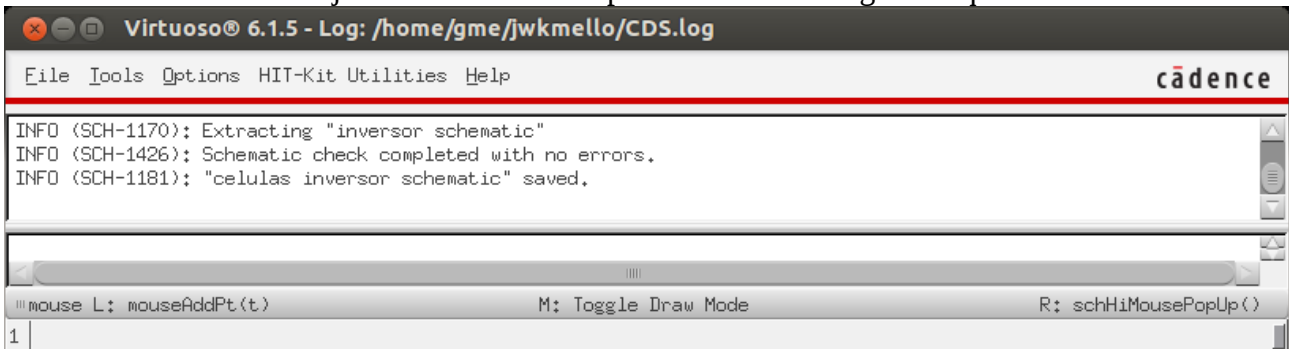
Coloque os pinos e faça as ligações corretamente:



Agora clique em:

Design → Check and Save

Como não havia erros na janela de comandos apareceu uma mensagem de que não havia erros.



## CONSTRUINDO O SÍMBOLO: – ATENÇÃO EM SALA DE AULA FOI ENSINADO UM JEITO BEM MAIS RÁPIDO.

Feito isso agora necessitamos criar um símbolo para o nosso esquemático. Para isso volte a janela “Library Manager” selecione a biblioteca e o inversor, então:

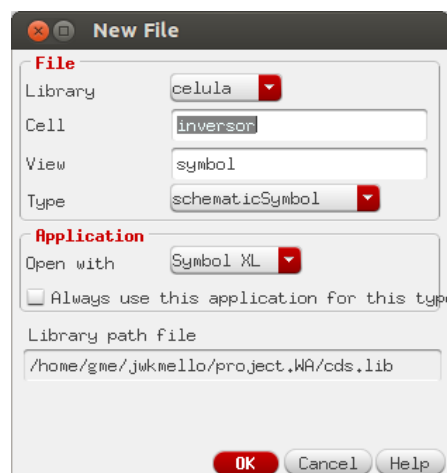
File → New → Cell View ...

Nas combo boxes desta vez selecione:

schematicSymbol

Symbol XL

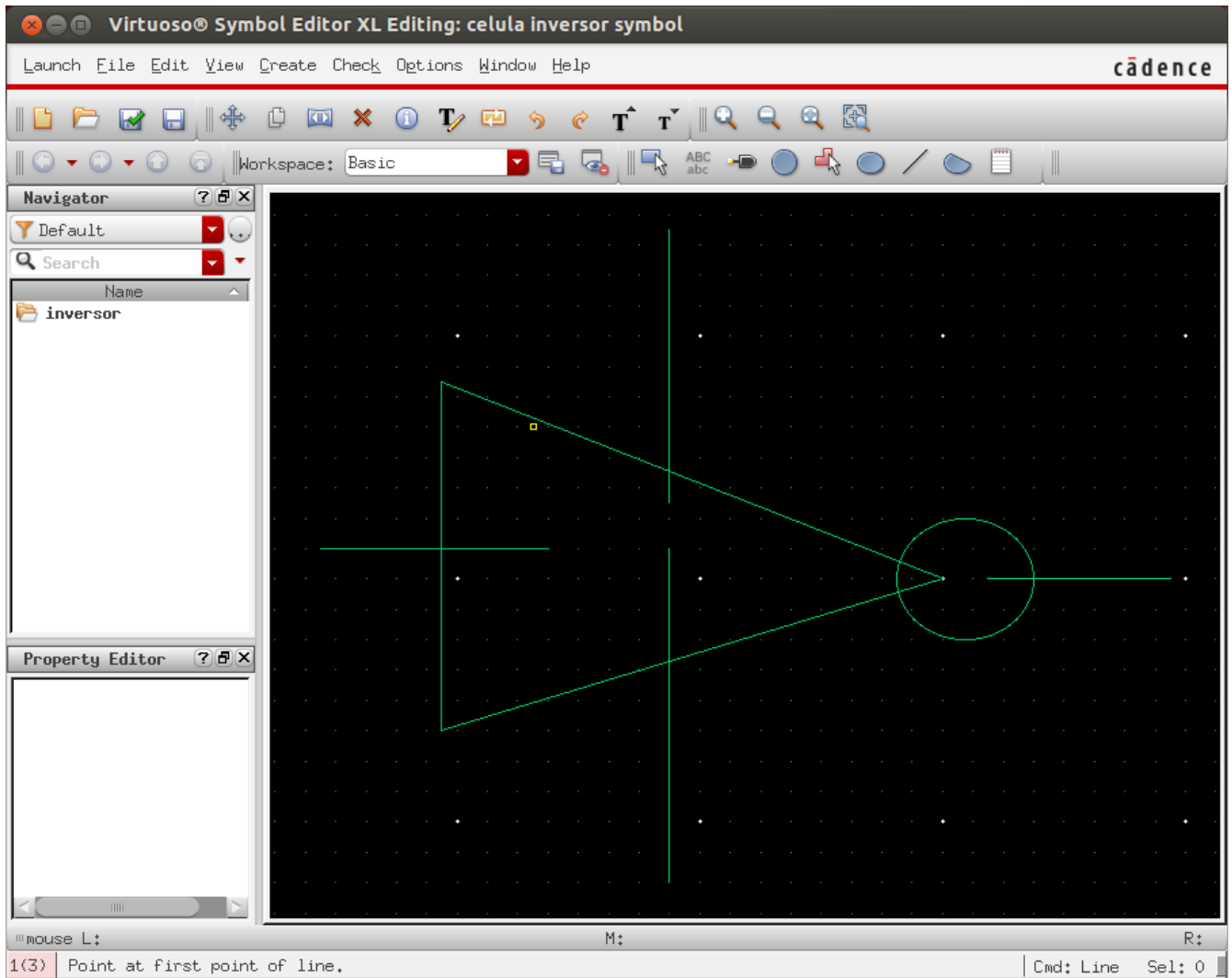
Ok



Agora vamos desenhar nosso simbolo:

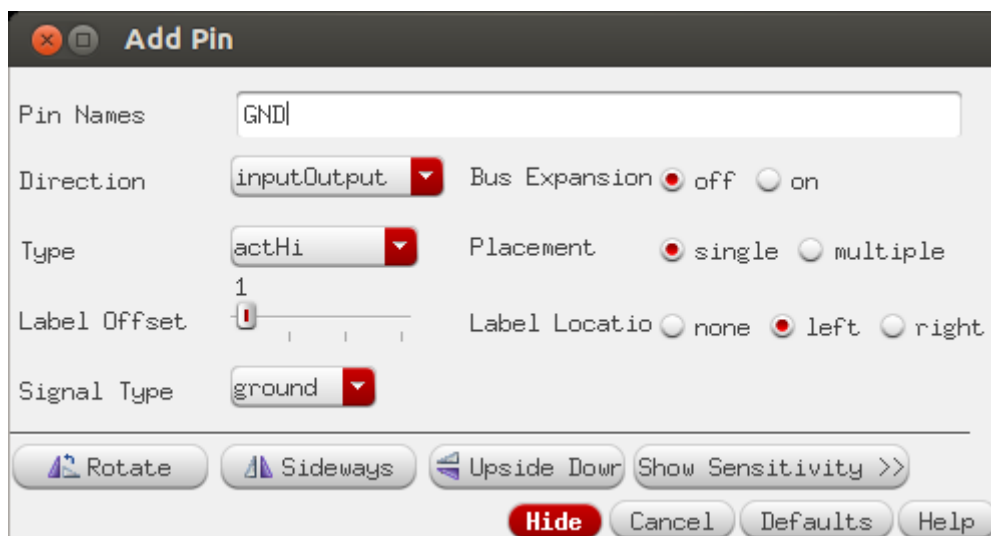
Create → Shape → Line

\*Clique (Solte) – Arraste – Dois Cliques para soltar a linha



Agora criaremos os pinos:

Create → Pin...



Crie os próximos pinos, exatamente como foram criados no esquemático. DEVEM TER O MESMO NOME.

VDD → Direction - “inputOutput”  
Signal Type - “power”

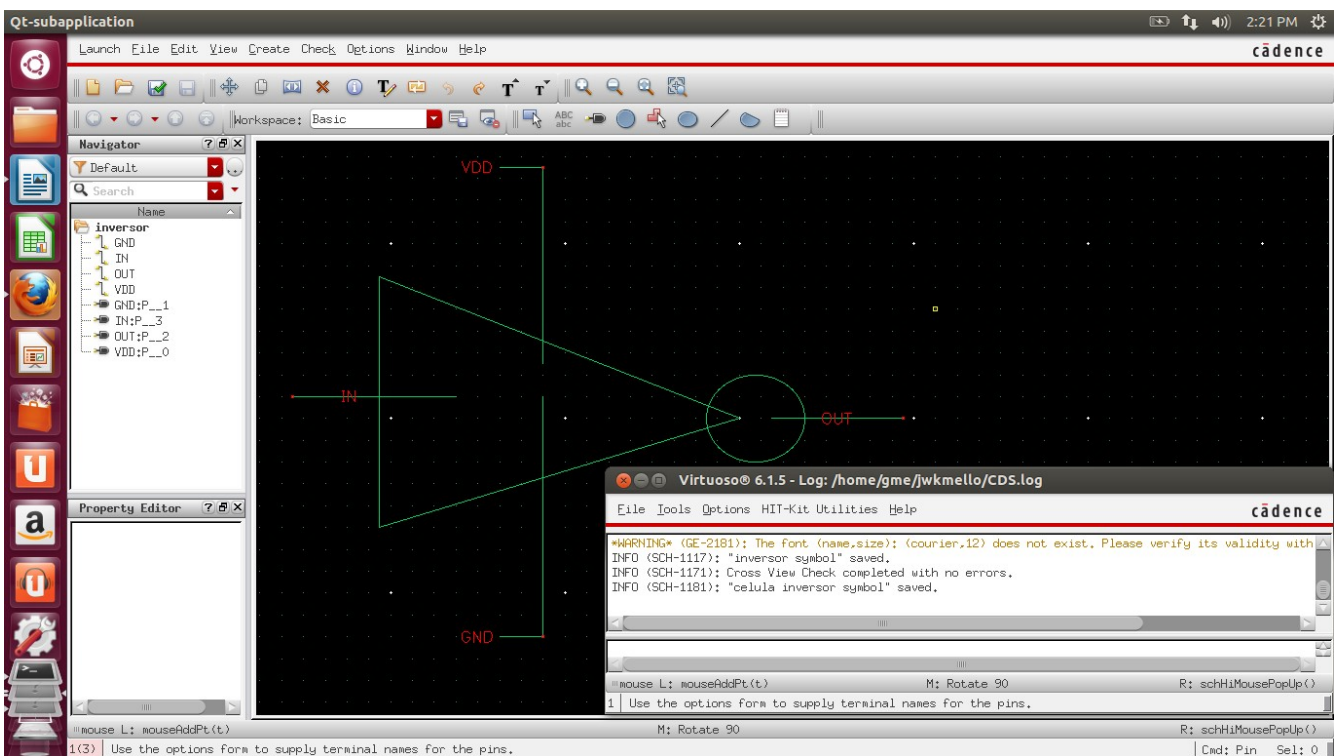
IN → Direction - “input”  
Signal Type - “signal”

OUT → Direction - “output”  
Signal Type - “signal”

GND → Direction - “inputOutput”  
Signal Type - “ground”

Clique em **File** → **Check and Save**

Seu Símbolo deve ter ficado assim:



## SIMULAÇÃO DC:

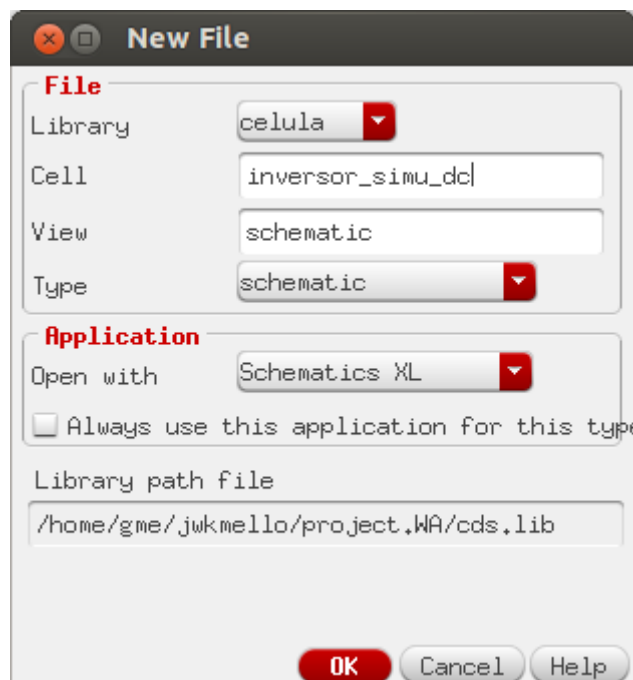
1)

Agora faremos outro esquemático usando o simbolo do esquemático anterior para poder simular. Feito isso estamos prontos para simular o circuito, e obter a função de transferência DC (Vout vs Vin) e as Margens de Ruído.

Para isso crie uma nova célula.

File → New -> Cell View

Pus o nome de “[inversor\\_simu\\_dc](#)” e seleccionei as opções “[schematic](#)” e “[Schematics XL](#)”.



Agora vá em:

Create → Instance

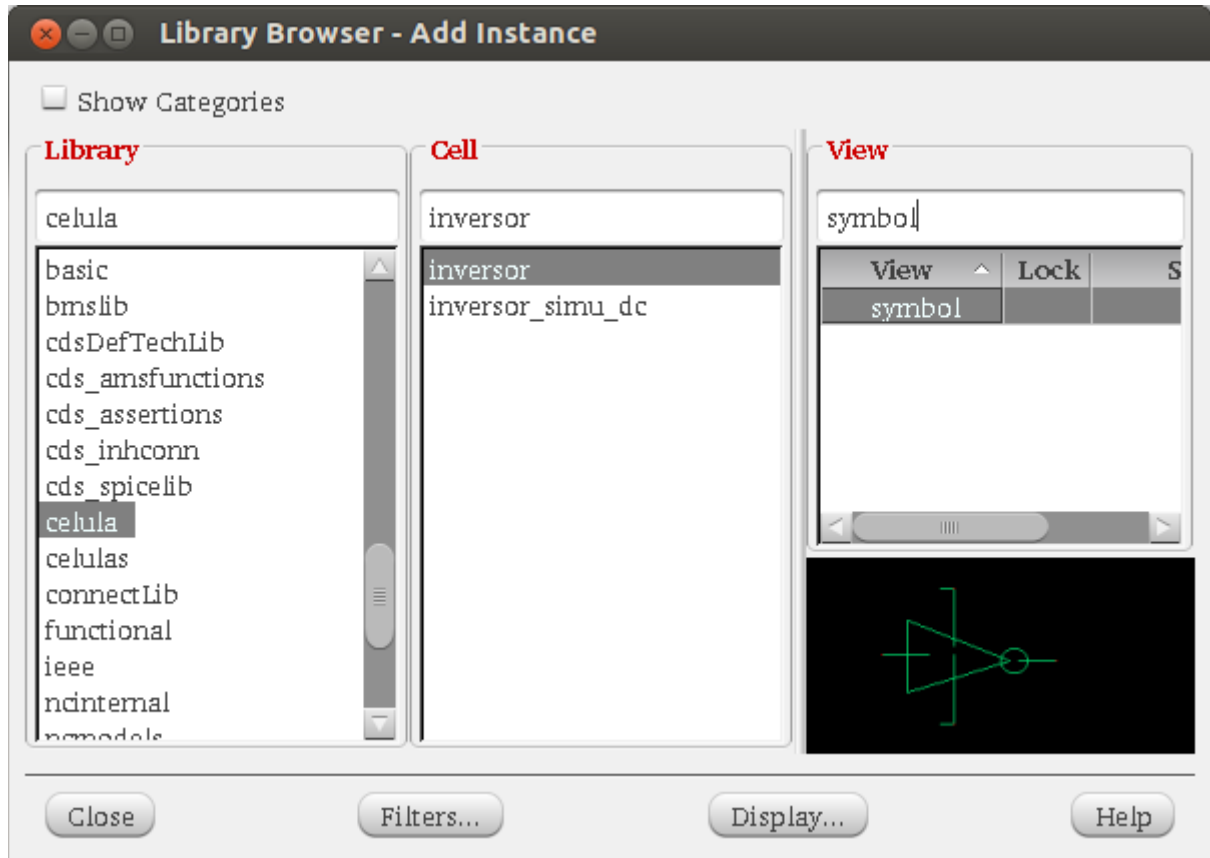
Browse

Selecione:

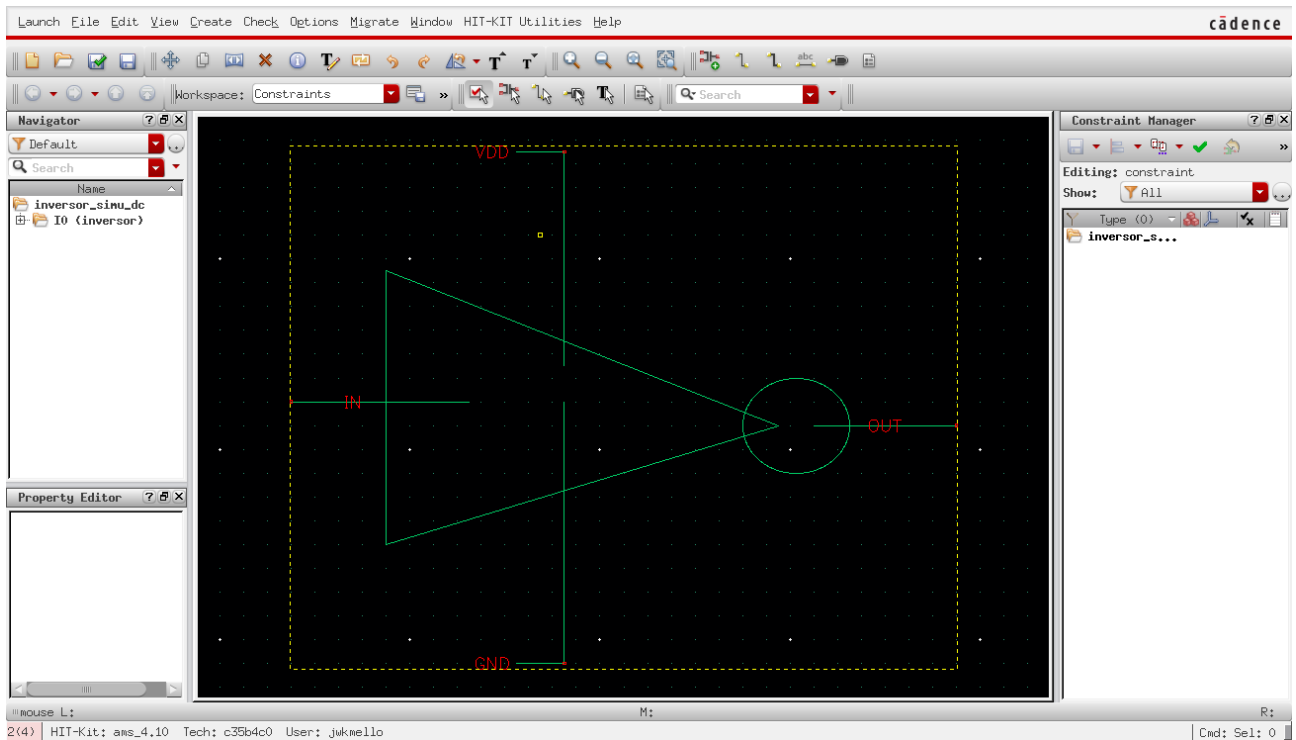
[celula](#)

inversor  
symbol

Tudo que fizemos foi pegar o símbolo criado anteriormente.



Coloque ele no esquemático.



Depois adicione um vdc (Fonte de alimentação para o inversor)

Create → Instance

Browse

Selecione:

analogLib  
vdc  
symbol

Para o parâmetro “DC voltage” atribua 3.3 V.  
Coloque ele ligado no VDD.

Adicione também 3 GND (terra). Um para cada fonte e um para o inversor.

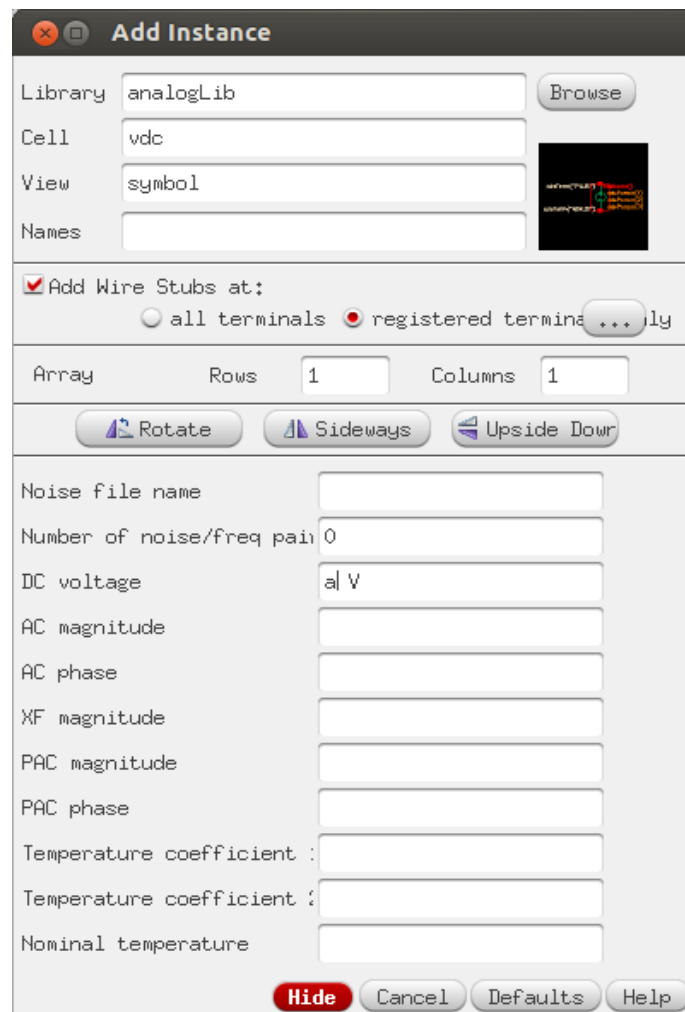
Create → Instance

Browse

Selecione:

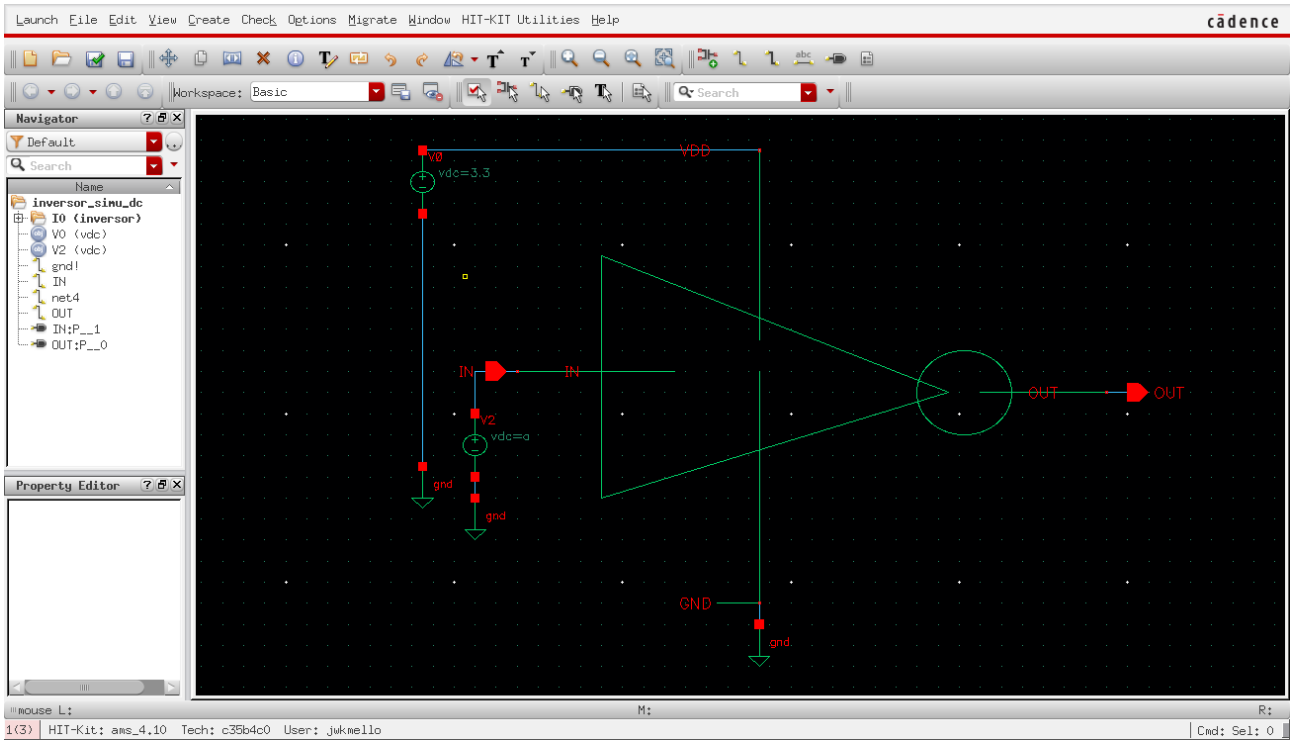
analogLib  
gnd  
symbol

Adicione também uma fonte de entrada para o inversor ("vdc") onde no lugar de 3.3 V coloque a variável "a". Adicione também um pino de saída para o inversor.



Adicione um pino de IN de entrada e um OUT de saída.

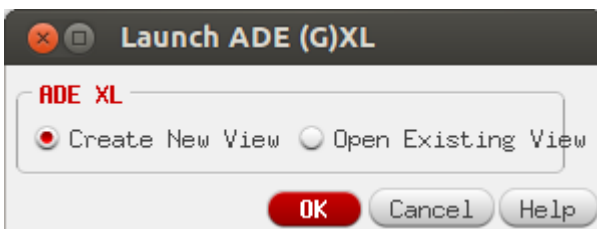
Agora é só ligar tudo corretamente.



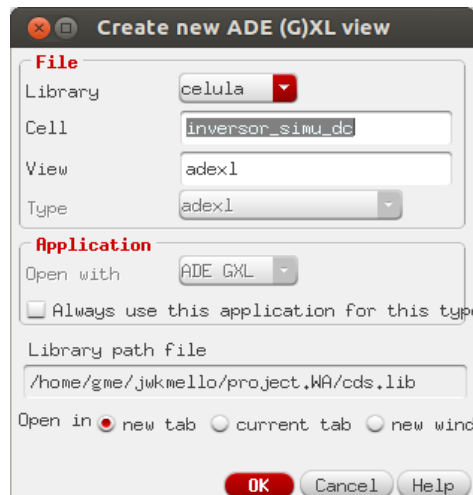
Design -> Check and Save

Se não der nenhum erro estamos prontos para começar o processo de simulação respondendo ao item número 1 do trabalho.

Launch → ADE GXL

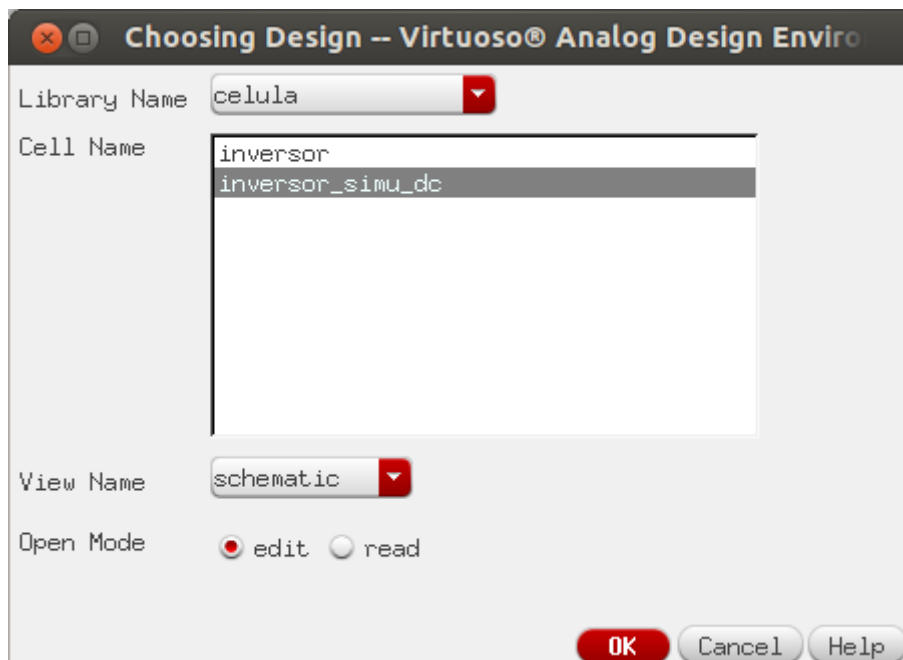
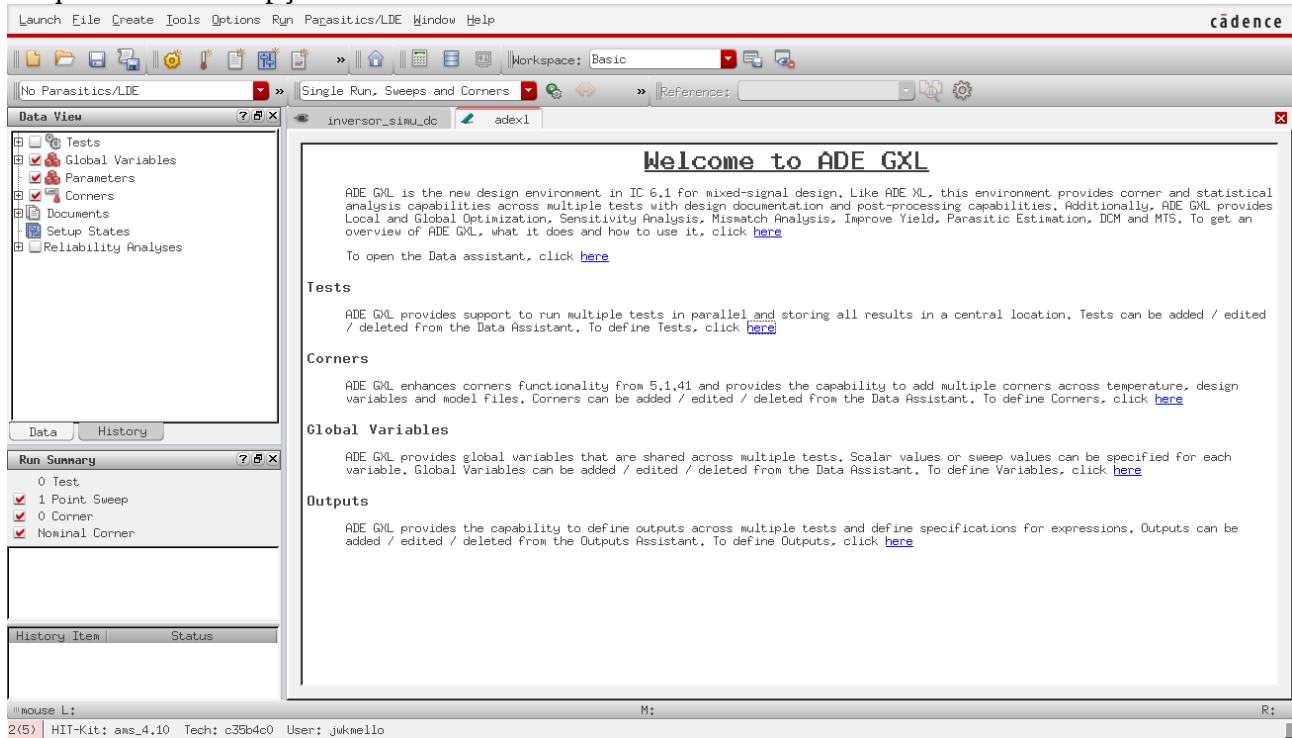


OK



OK

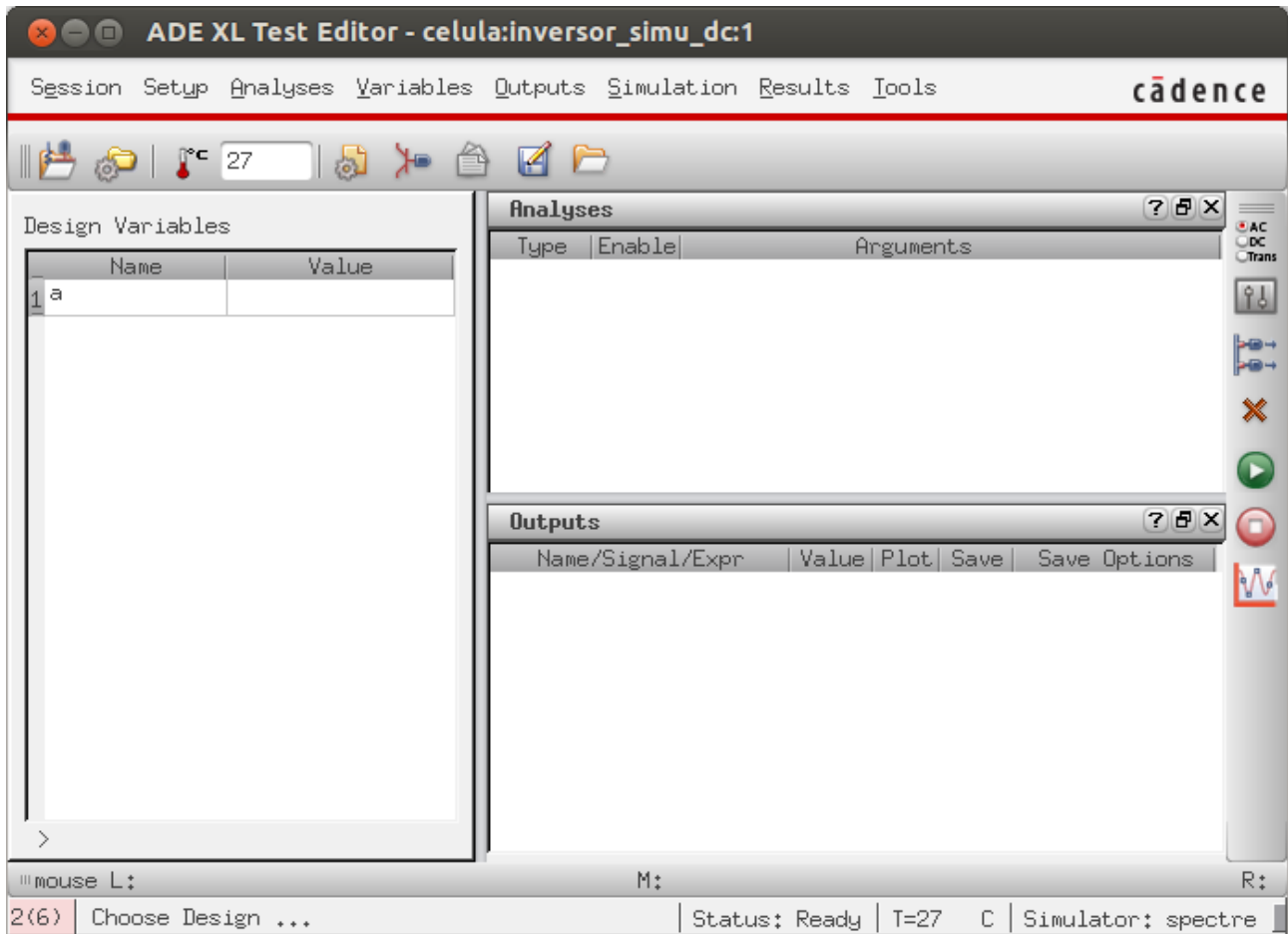
Clique em [here](#) da opção **Tests**



OK

Variables → Copy From Cell View

A variável “a” deve ter sido adicionado a janela do canto esquerdo:



Agora:

Analyses → Chosse...

Uma nova janela se abriu marque:

DC

Embaixo:

Design Variable

Clique em:

Select Design Variable

Escolha a variável “a”.

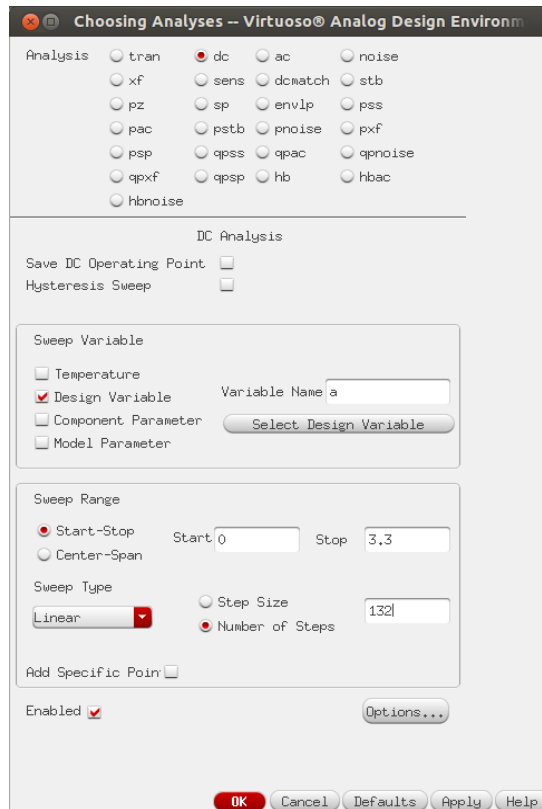
Embaixo:

“Start” recebe 0 , “Stop” recebe 3.3

Em “Sweep Type” selecione “Linear”

Marque a opção “Number of Steps”

No textbox ao lado você deve colocar um valor em torno de “132”.



Agora na janela principal de controle vá em:

Outputs → To Be Plotted → Select On Schematic

Selecione os fios de entrada (IN) e a saída (OUT)

Falta agora escolher um valor para a:

Selecione “a” com um clique.

Vá em:

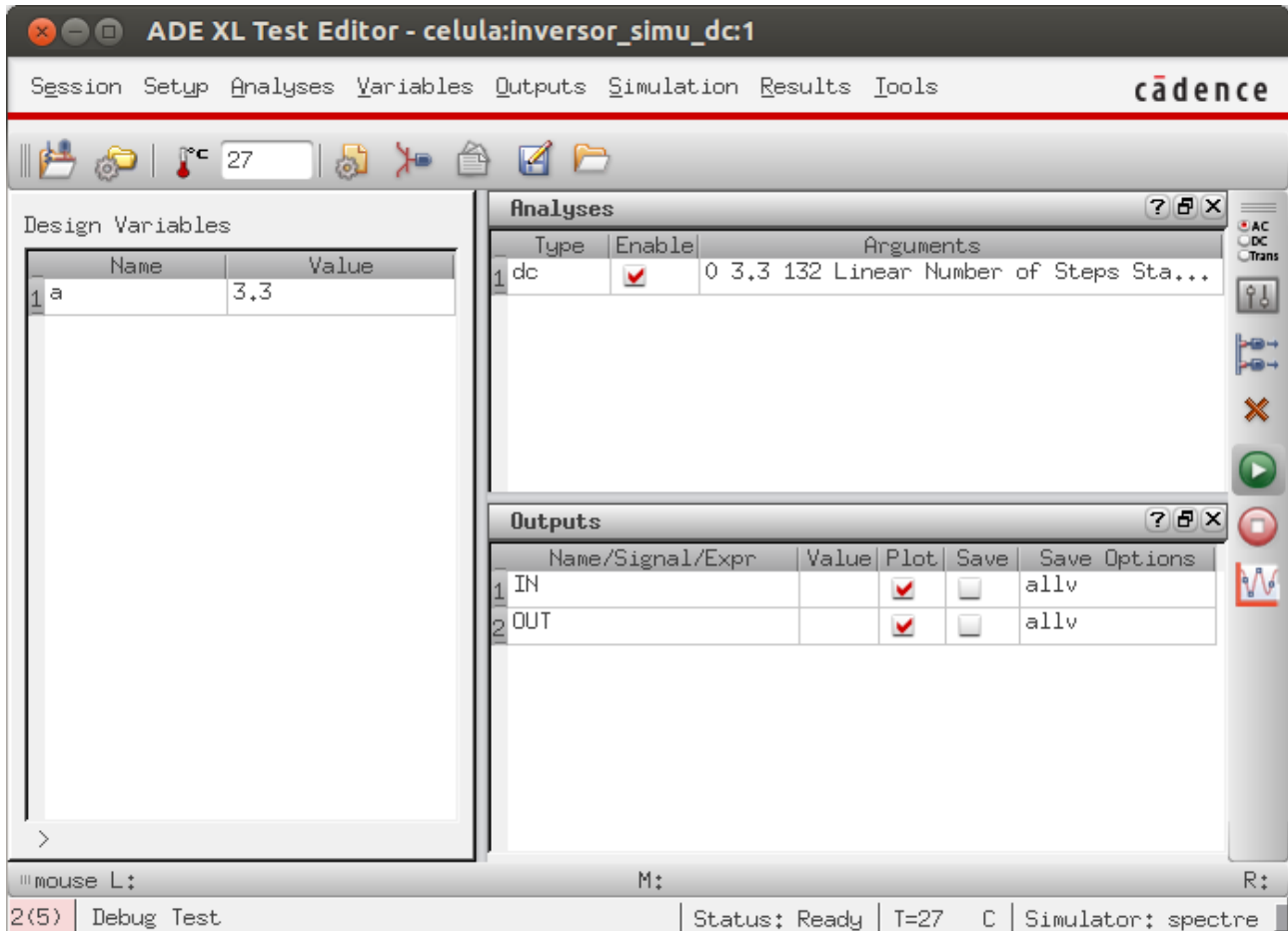
Variables → Edit

Na janela que abrir:

Selecione o “a”

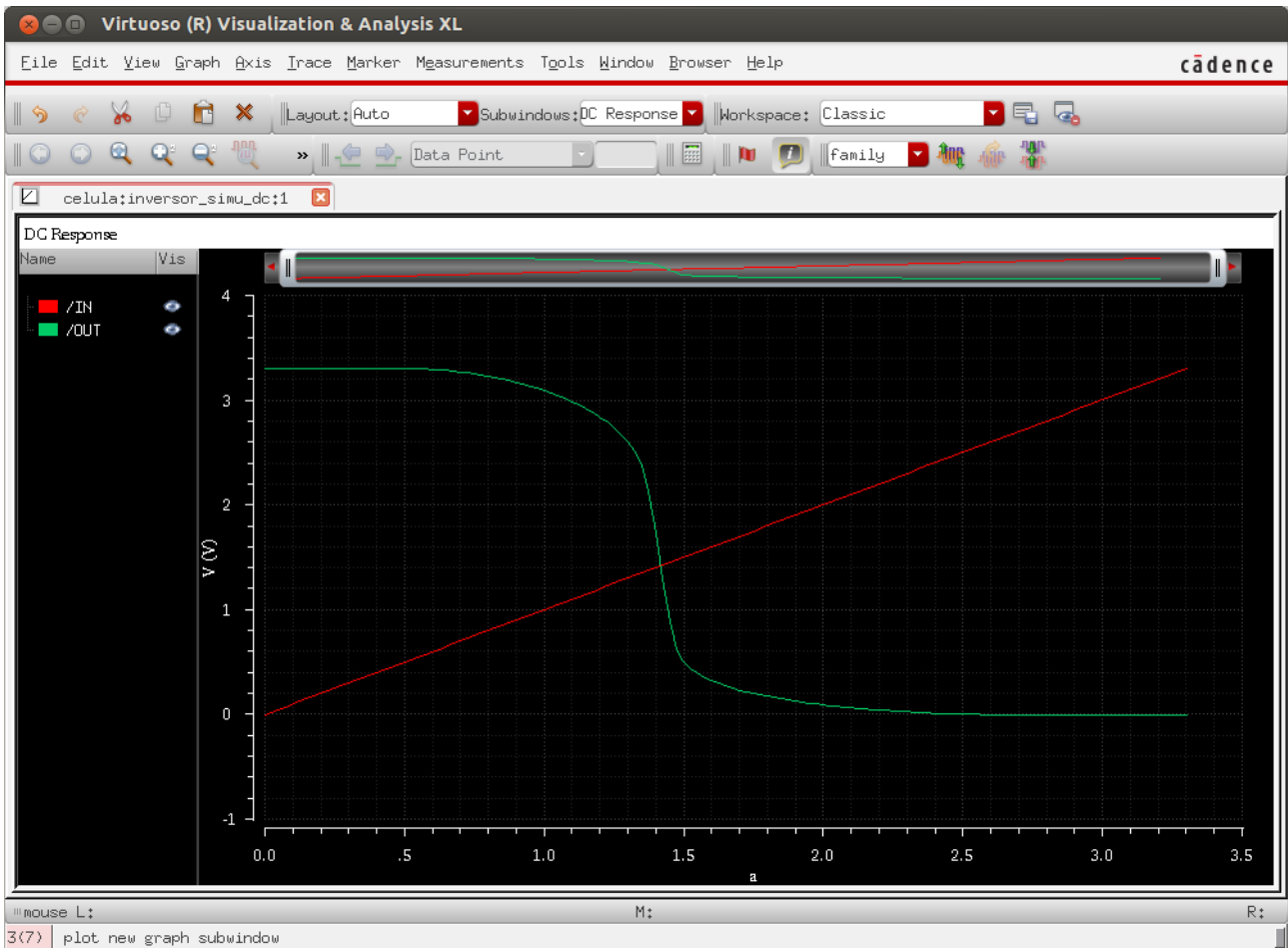
“Value (Expr)” recebe 3.3 então

OK



Por fim:

Pressione o botão Verde.



Eis a curva  $V_{out}$  vs.  $V_{in}$ .

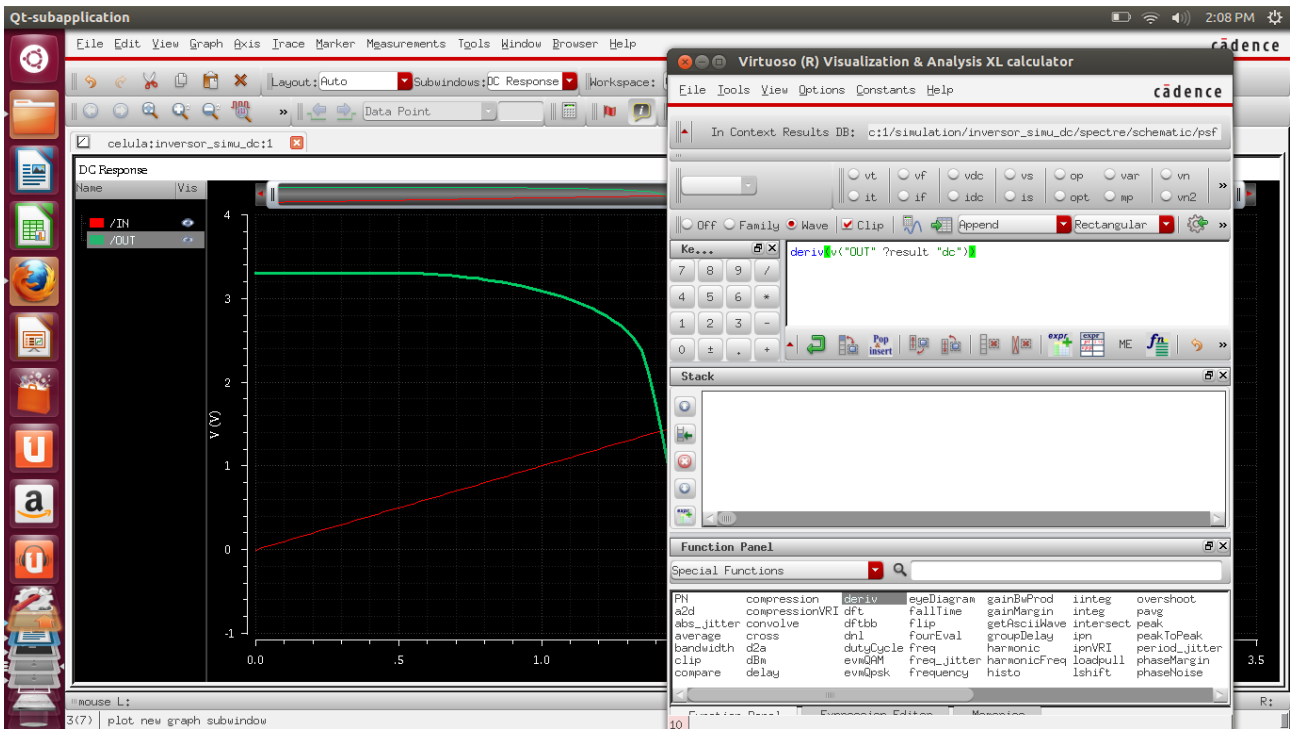
Agora iremos calcular as margens de ruído:

**Tools** → **Calculator**

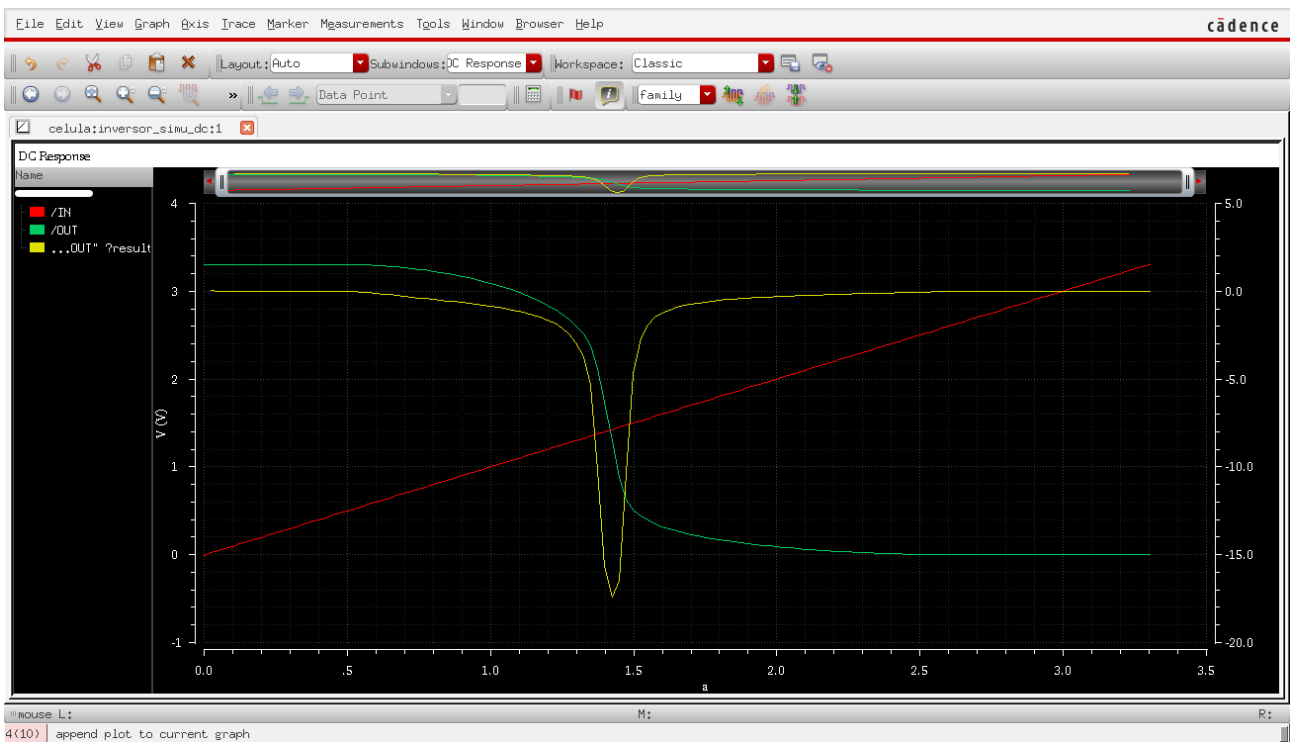
Marque a opção “Wave”.

Selecione a onda no gráfico, ela muda de cor e na calculadora aparece algumas coisas escritas.

Depois escolha a opção “deriv”.



Por fim **Tools** → **Plot**



Se tudo der certo o programa plotará o gráfico da derivada desta curva junto dela. Você pode separar os dois gráficos clicando no quarto botão do Menu de Ferramentas.

Agora selecione a curva gerada, e vá em:

Marker → Add

Na janela em que abrir , selecione “Horiz” em “Position(Y)” coloque -1.

Clique em “Apply”. E uma janela irá abrir com os valores respectivos dessas posições, anote:



No nosso caso apareceu:

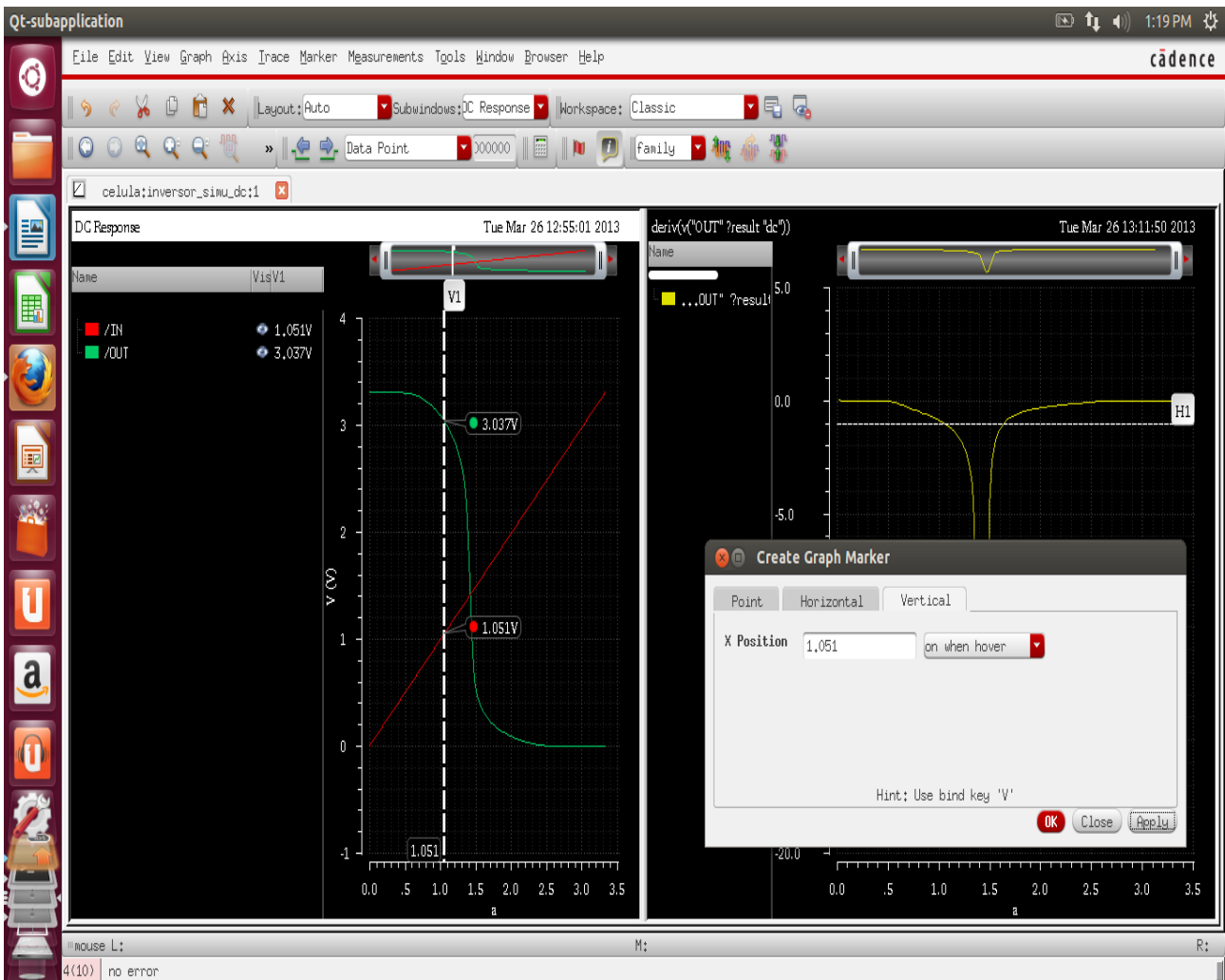
Vil = 1.051

Vih = 1.639

Agora para calcular OUT selecione o gráfico de cima e:

Marker → Add

Na janela em que abrir , selecione “Vert” em “Position(X)” coloque 1.051



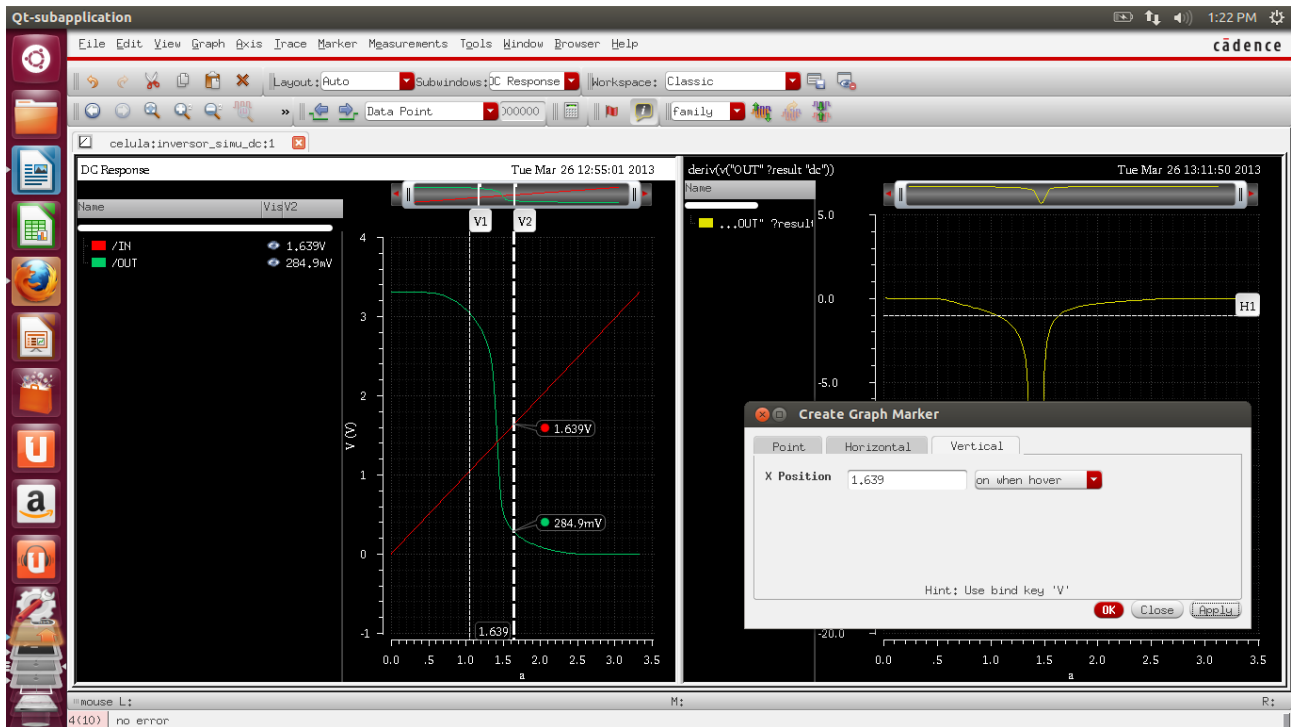
Como podemos ver:

$V_{oh} = 3.037$

E para  $V_{ol}$  faça:

**Marker** → **Add**

Na janela em que abrir , selecione **“Vert”** em **“Position(X)”** coloque 1.639



Como podemos ver:

$V_{ol} = 284.9\text{m}$

**CALCULANDO AS MARGENS DE RUÍDO ALTA E BAIXA:**

$MR_h = V_{oh} - V_{ih} = 3.037 - 1.639 = 1.398 \text{ V}$

$MR_l = V_{il} - V_{ol} = 1.0515 - 0.2849 = 0.7666 \text{ V}$

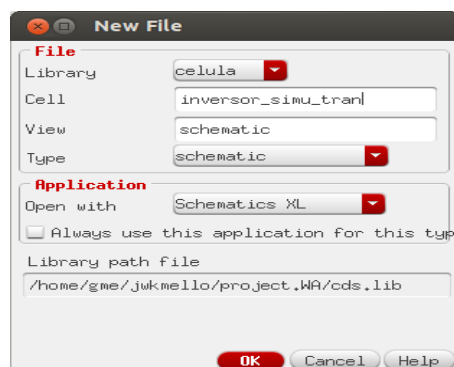
## SIMULAÇÃO TRANSIENTE

2)

Agora iremos fazer a simulação transiente do nosso inversor para descobrir o  $T_{rise}$ ,  $T_{fall}$ ,  $T_{phl}$  e  $T_{plh}$ . Para análise transiente precisamos de uma capacitância na saída. A análise transiente necessita de um inversor na saída e outro na entrada para assim tentar fazer o  $FanIn$  igual ao  $FanOut$ . A fonte de entrada agora sera uma  $V_{pulse}$ .

Para isso crie uma nova célula.

File → New -> Cell View



E depois faça que nem nós fizemos anteriormente colocando uma fonte para a entrada chamada  $V_{pulse}$  e um capacitor na saída de  $50f F$ .

Para adicionar a “ $v_{pulse}$ ” faça o seguinte:

Add → Instance

Browse

Selecionei:

analogLib

vpulse

symbol

Configurei as seguintes medidas para ele:

“Voltage 1” = 3.3 V

“Voltage 2” = 0.0 V

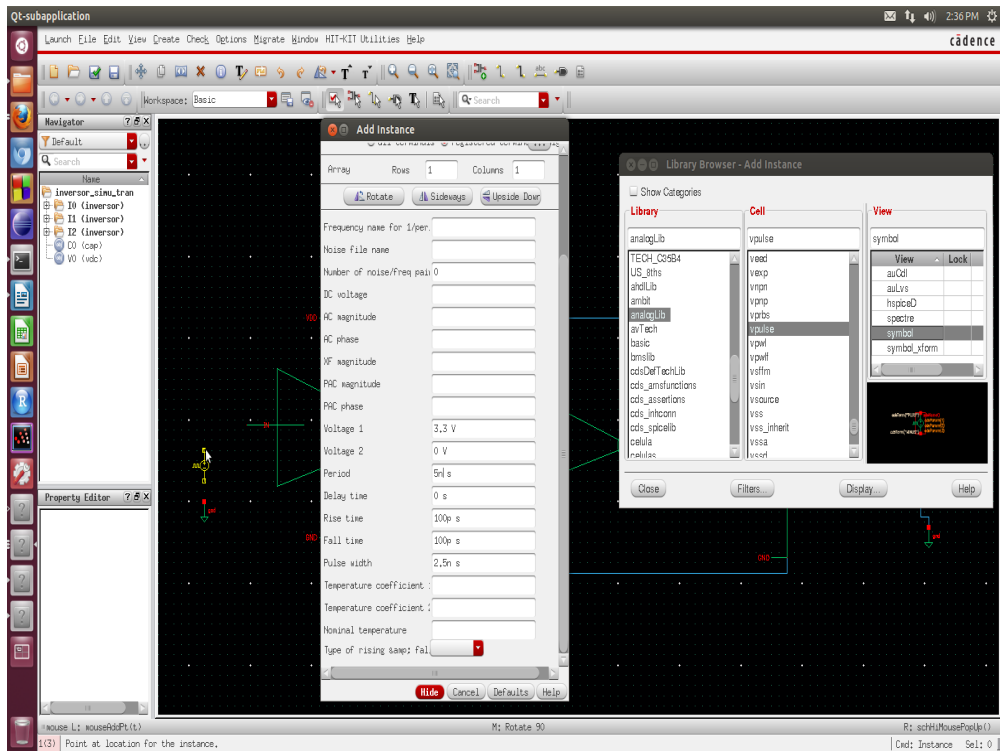
“Delay Time” = 0n s

“Rise Time” = 100p s

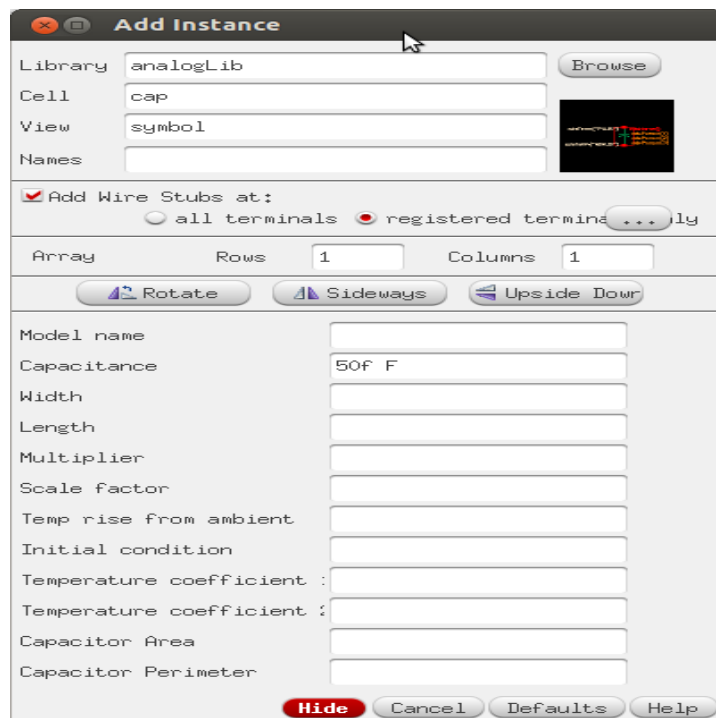
“Fall Time” = 100p s

“Pulse Width” = 2.5n s

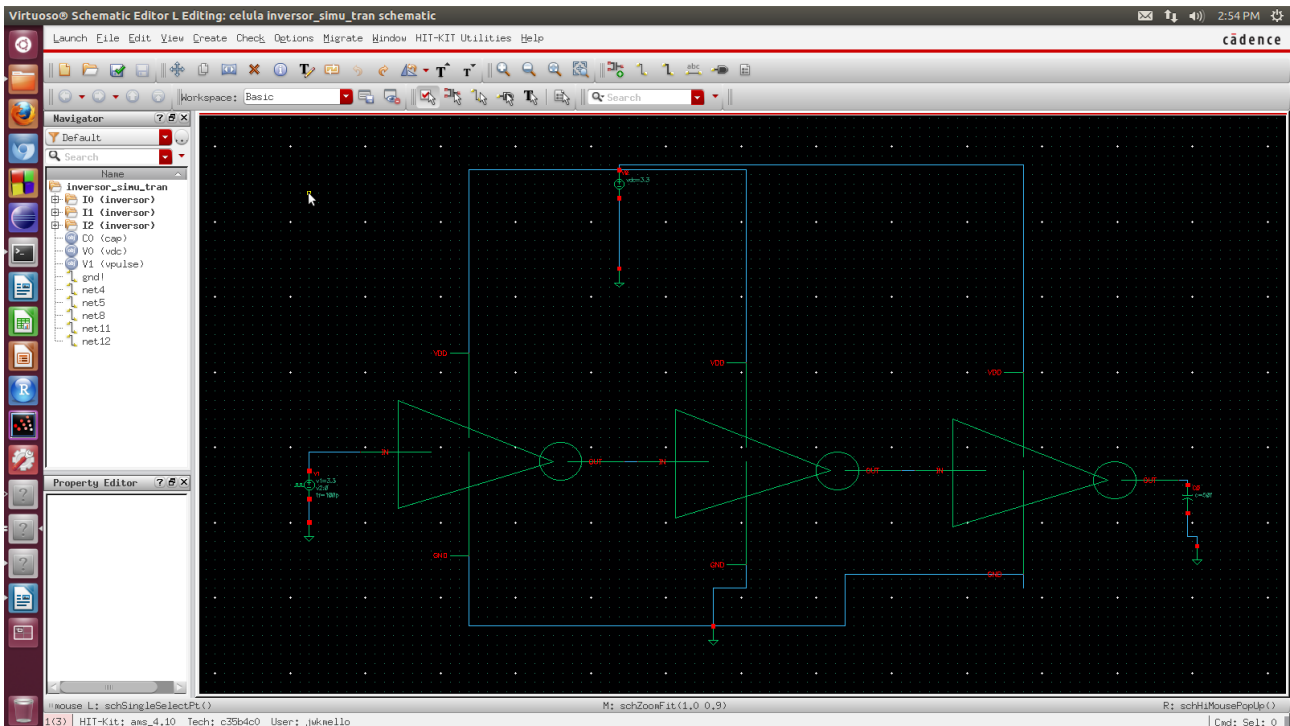
“Period” = 5n s



No mesmo “analoglib” seguindo os passos anteriores escolha um capacitor “CAP” para saída e de o valor de 50f.



## Check and Save



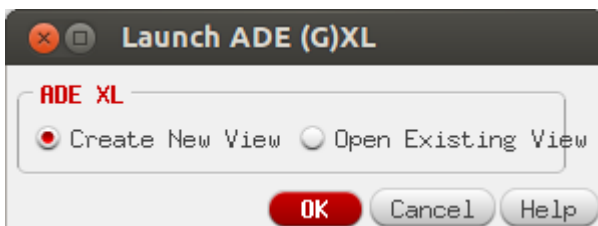
Agora iremos simular o circuito.

Design - > Check and Save

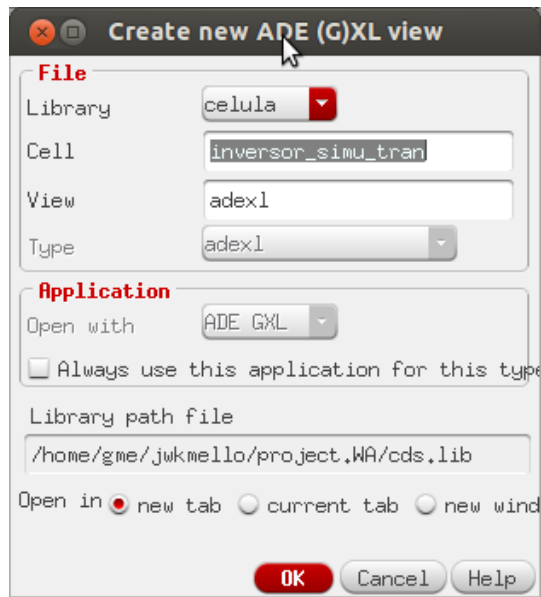
OBS: SEMPRE use Check and Save, e não apenas Save

Se não der nenhum erro estamos prontos para começar o processo de simulação respondendo ao item número 1 do trabalho.

Launch → ADE GXL



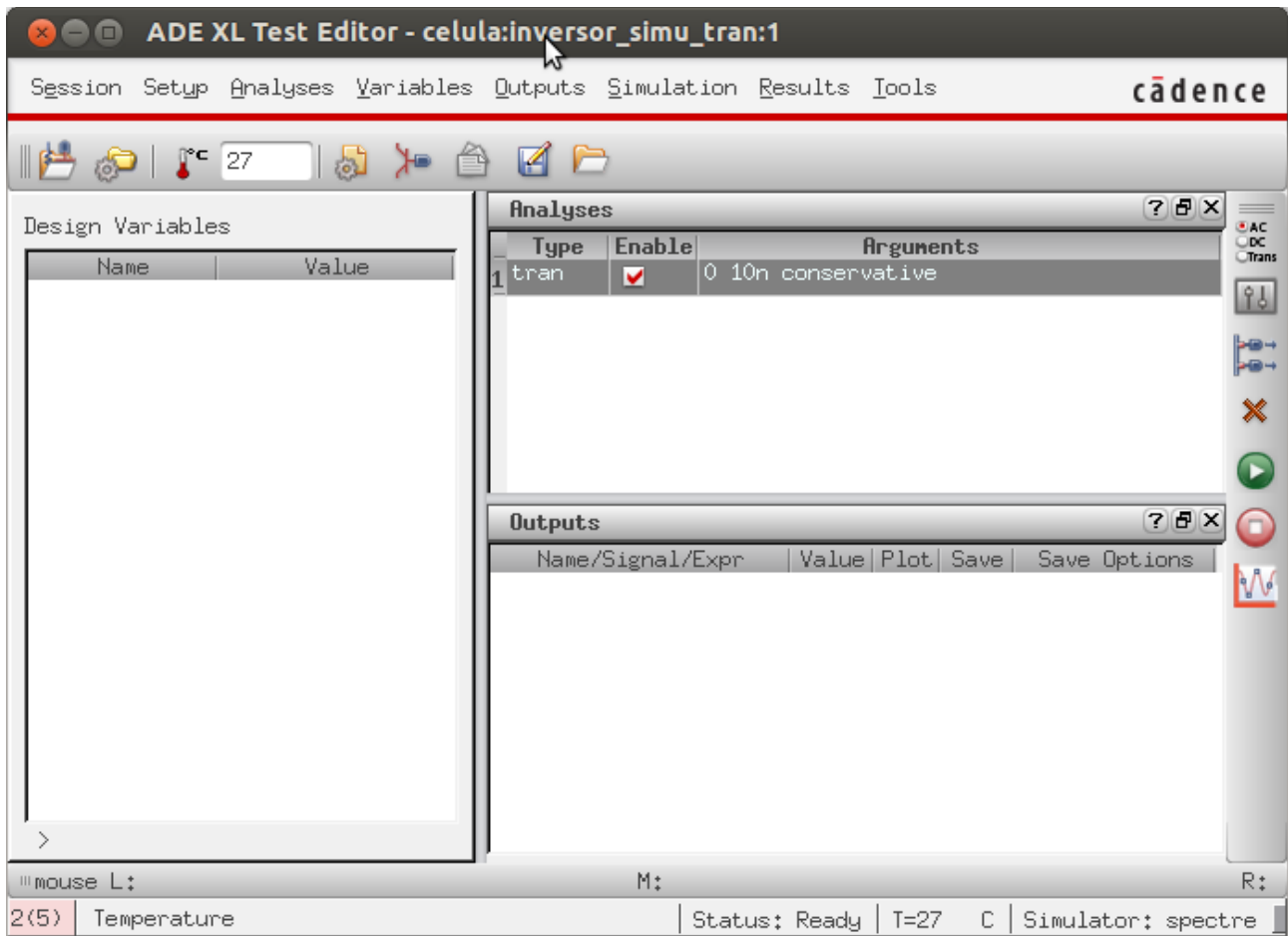
OK



OK

Clique [here](#) em Tests





OK

Analyses → Choose ...

Na janela que abrir marque “tran” e em “Stop Time” coloque 10n.

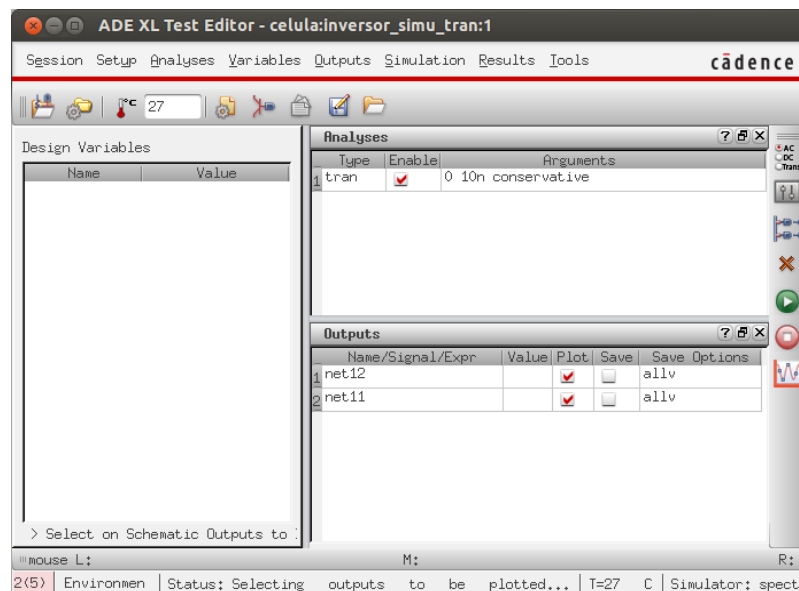


OK

Agora na janela principal de controle vá em:

Outputs → To Be Plotted → Select On Schematic

Selecione o fio que entra no segundo transistor e o fio que sai do segundo transistor.

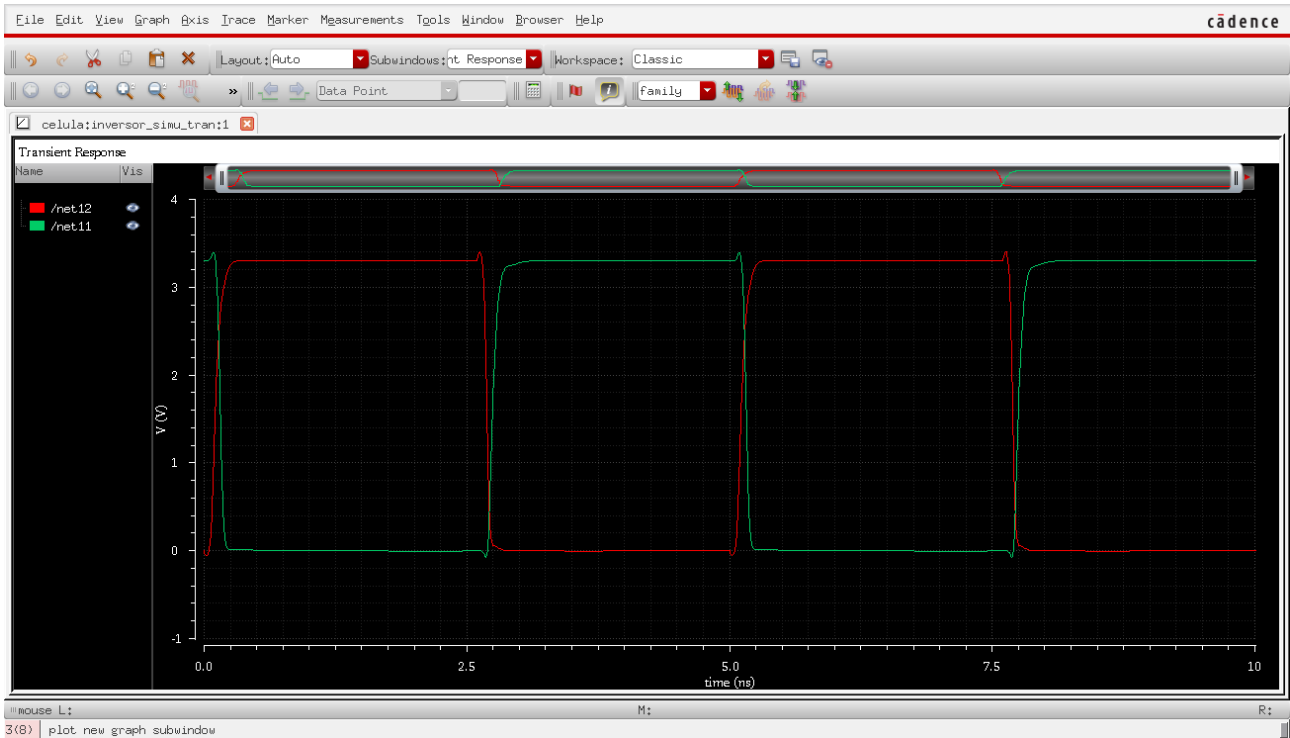


OBS: IMPORTANTE para facilitar a análise pode-se adicionar nomes aos fios clicando no seguinte botão no Editor.



Por fim:

Pressione o botão Verde.



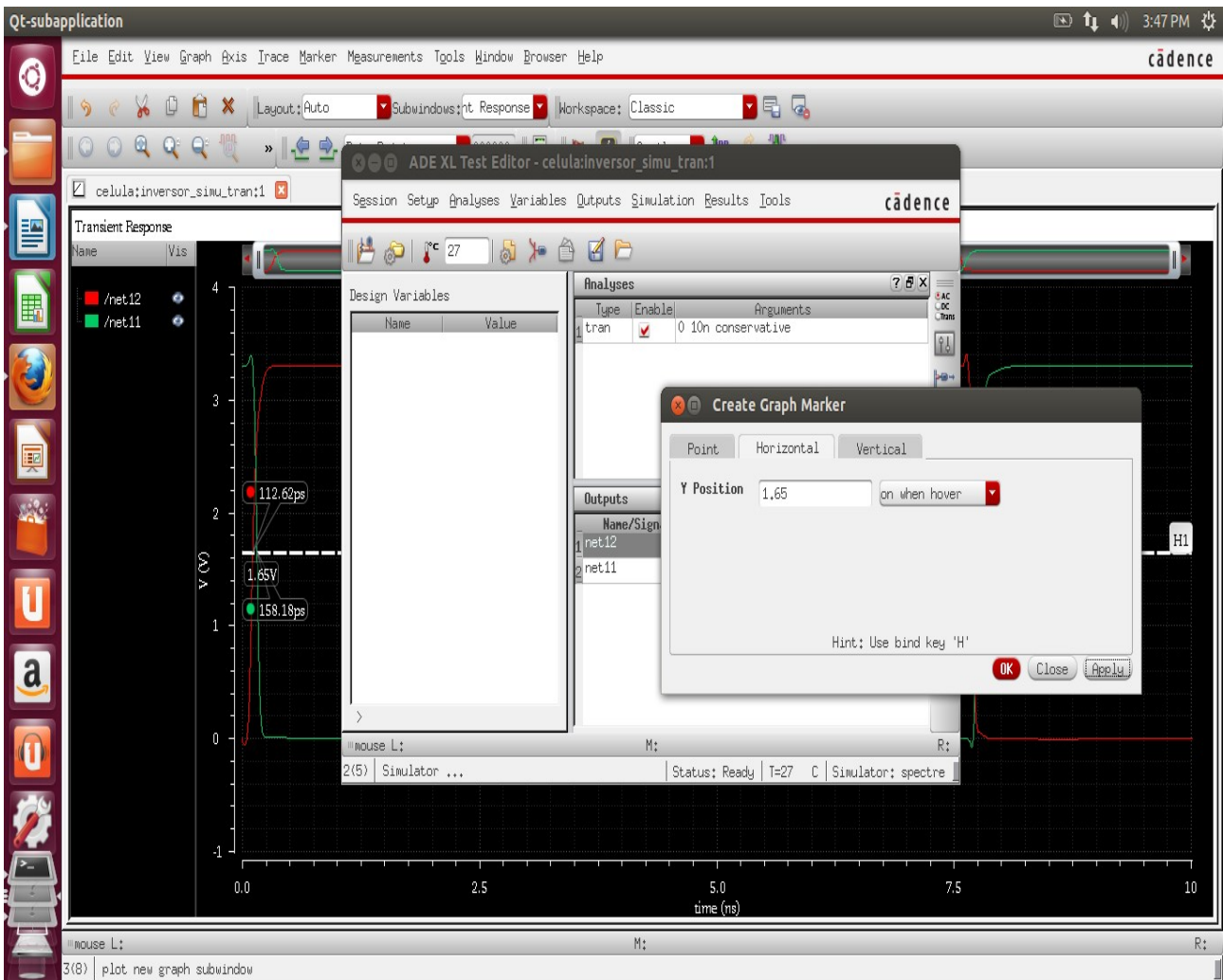
Temos aqui o nosso gráfico , agora estamos aptos a calcular  $t_{phl}$  e  $t_{plh}$ :

Vá em:

**Marker** → **Create Marker...**

Selecione **“Horizontal”** em **“Position(Y)”** coloque 1.65 que é 50% de 3.3, os pontos serão marcados.

Neste nosso exemplo a **net11** é a saída do inversor logo o primeiro valor é o  $t_{phl}$  pois a saída está descendo e a entrada subindo. E o segundo é o  $t_{plh}$  pois ocorre o contrário.

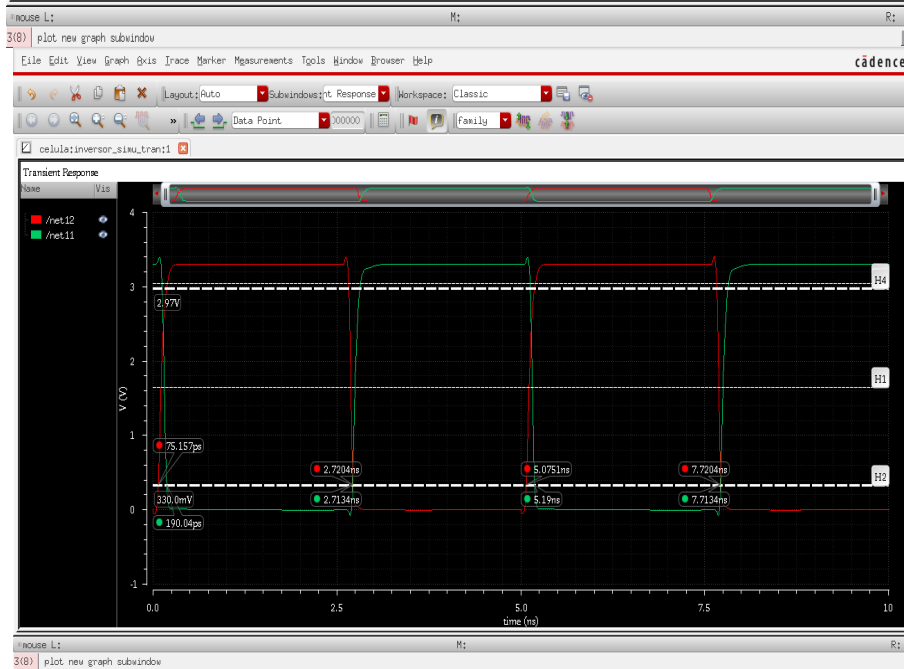
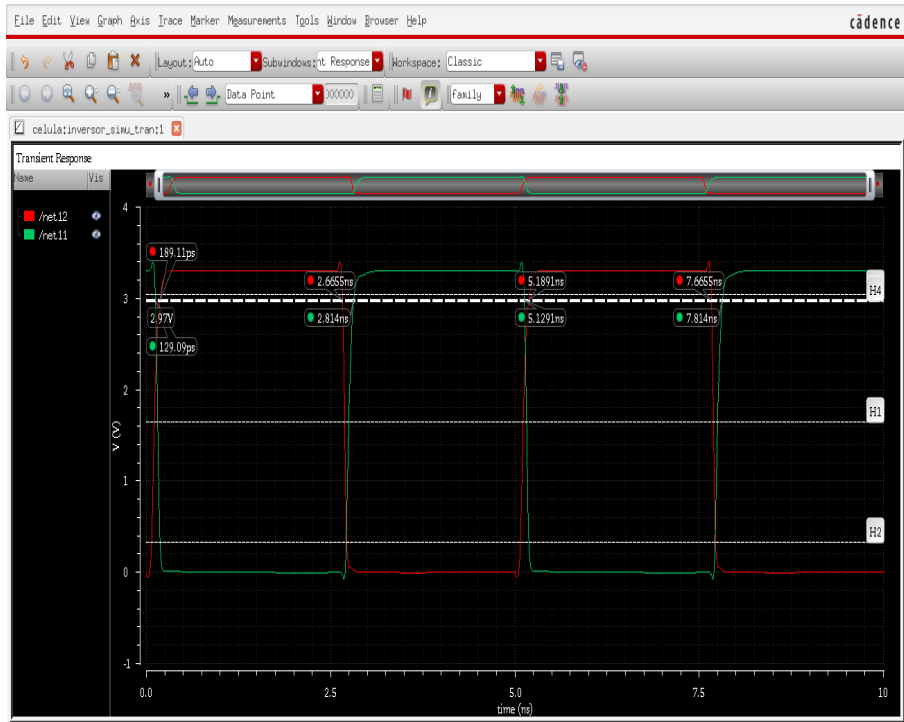


$$t_{phl} = 158.18\text{p} - 112.62\text{p} = 45.56\text{ ps}$$

$$t_{plh} = 2.7483\text{n} - 2.6916\text{n} = 0.0566\text{n} = 56.6\text{ ps}$$

$$t_p = (t_{phl} + t_{plh}) / 2 = (45.56 + 56.6) / 2 = 51.08\text{ps}$$

Agora iremos calcular o Trise e Tfall para isso marque retas em 10% e 90% na voltagem, o Trise será tempo de 10% até 90% (quando a saída estiver subindo) e o Tfall será tempo de 90% - até 10% (quando a saída estiver descendo).



Como podemos ver:

$$T_{fall} = 190.04p - 129.09p = 60.95ps$$

$$T_{rise} = 2.814n - 2.7134n = 0.1006n = 100.6ps$$

3)

Temos de calcular a potência consumida pelo inversor, a frequência de 200MHz que é o valor de 5ns que escolhemos para fonte “vpulse”.

Na tela do gráfico vá em:

Tools → Calculator

Limpe qualquer valor dos cálculos anteriores.

Marque “it”

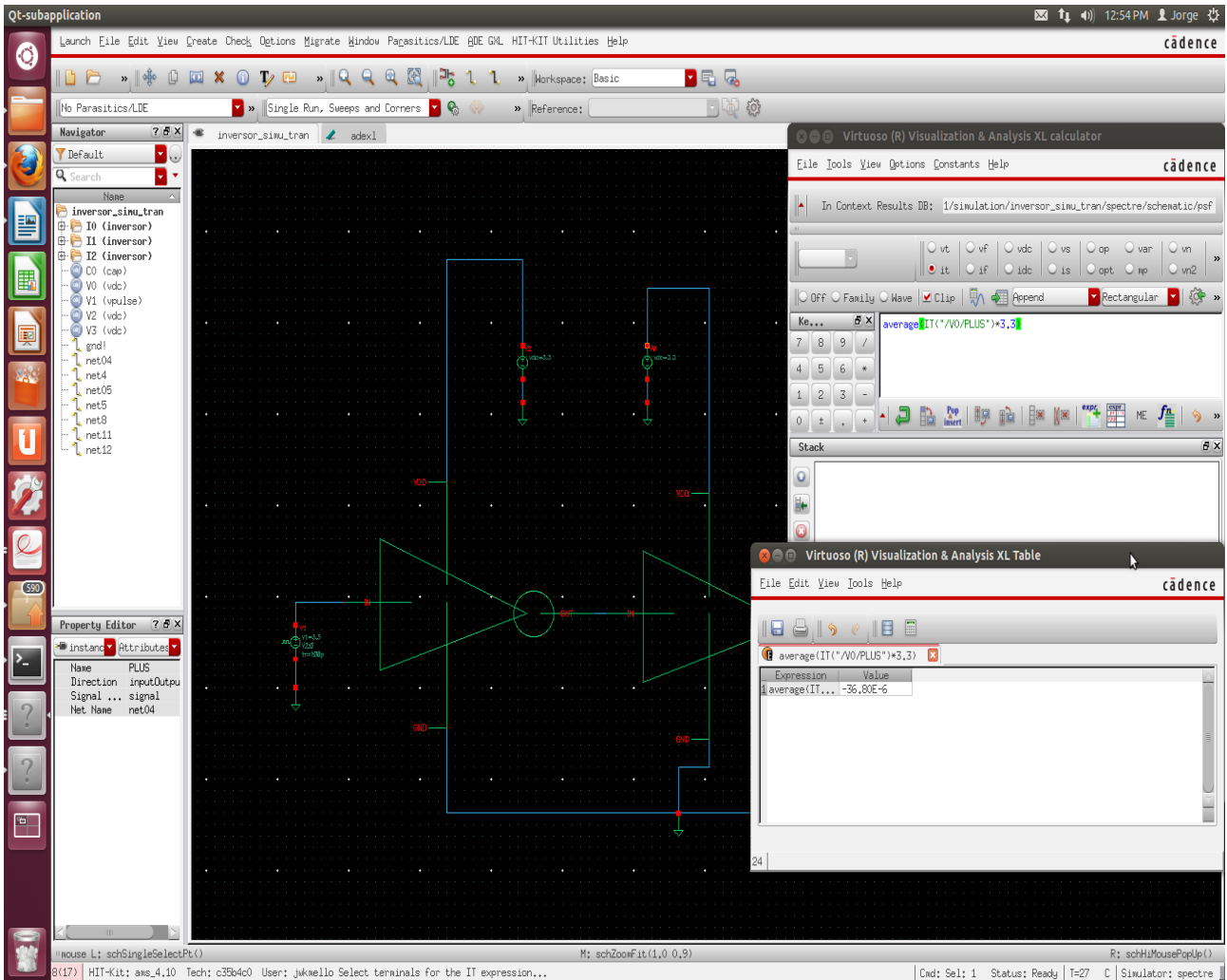
Selecione o quadradinho vermelho da segunda fonte no esquemático.

No textbox da calculadora vai aparecer “IT” , multiplique por 3.3, pois  $P = VI$ .

Selecione “Average”

Pro fim Tools → Table

OBS: IMPORTANTE deve se medir a corrente do inversor CENTRAL.



**A potência é : 36.80uW**

**4)Por fim:**

A energia média consumida é:

Energia = Potência \* 5n (Duração do período , tempo para par de transições L → H e H → L )

**Energia = 36.80m \* 5n = 36800n \* 5 n = 184000 \* 10<sup>-18</sup> J = 0.184pJ**

## CONSTRUINDO O LAYOUT:

Obs: Comando úteis

C – copiar

M – mover

ESC – cancelar comandos

F - centralizar

S – modificar o tamanho dos quadrados clicando na borda

Clicando neste botão no Editor as regras de desenho serão mostradas no momento de criação do layout:

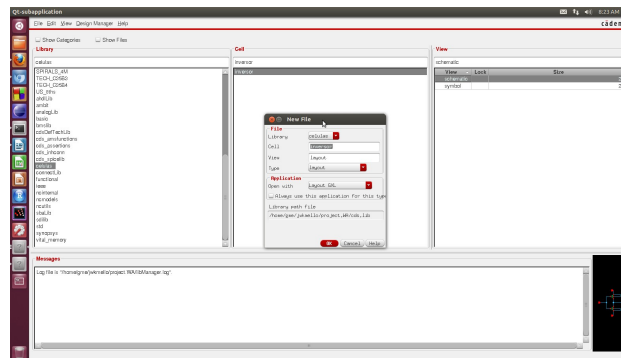


Selecione a biblioteca células no Library Manager, selecione o inversor, e clique **File → New → Cell View ...**

Type : **layout**

Open With: **Layout GXL** **\*\*\*IMPORTANTE ABRA COM O “GXL” PARA TER TODAS OPÇÕES\*\*\***

OK



Vamos usar a régua para marcar a altura da célula que foi pedida:

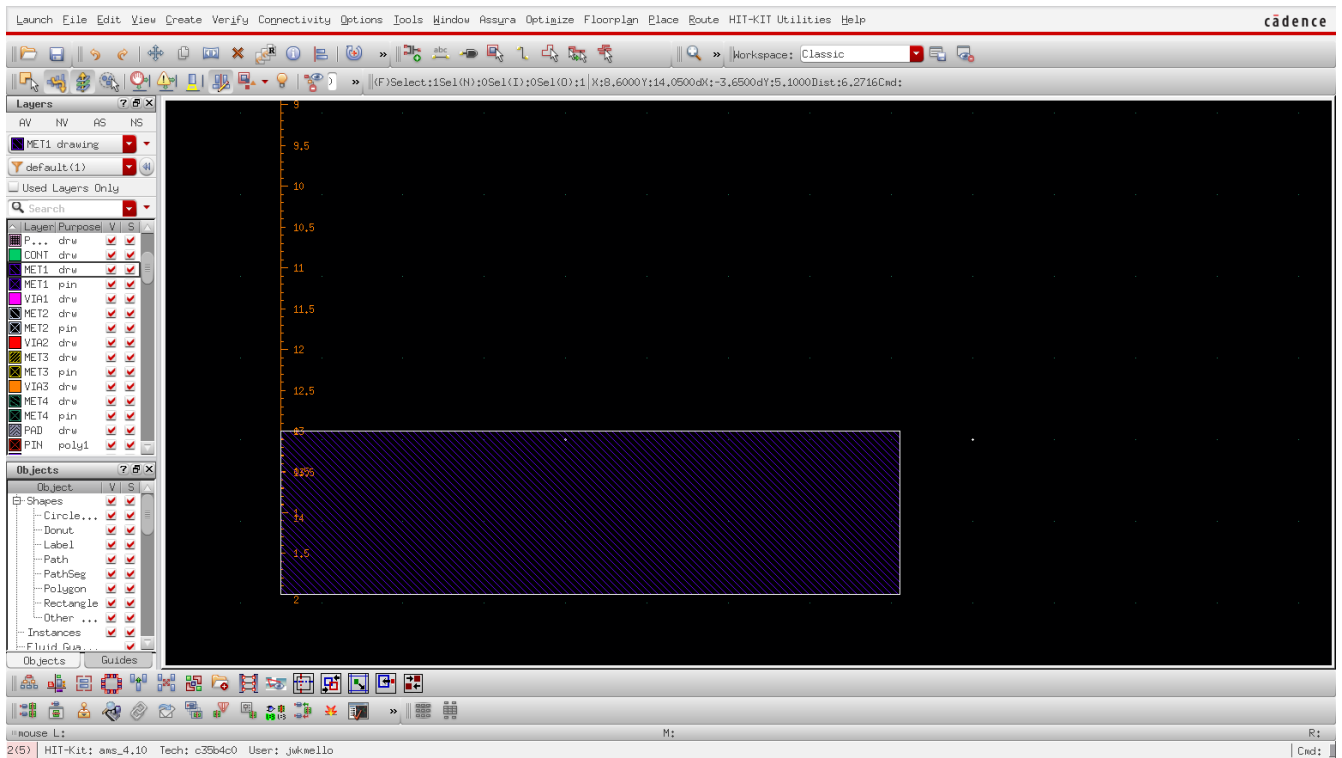
**Tools → Create Ruler**

Desenhe um linha de 14u, na marca de 1u e 13u desenhe um linha de alimentação de 2u. Neste espaço ficara as linhas de alimentação. Utilize **MET1 drw** para elas e pressione **R** para desenhar os retângulos.

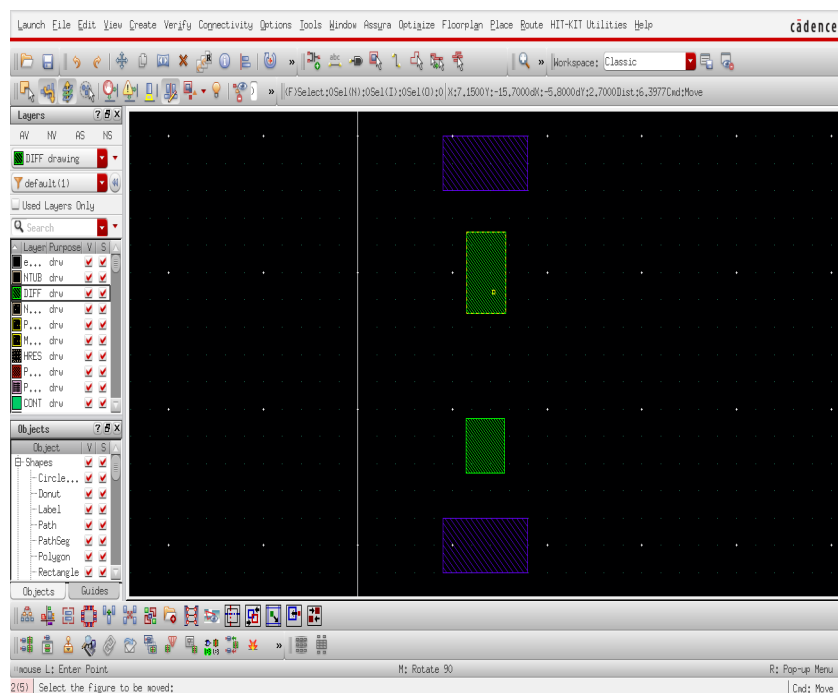
Criando os retângulos:

\*Clique (Solte) – Arraste – Clique novamente para soltar o retângulo

Feito um dos retângulos pressione **C** clique no retângulo e mova o mouse para cima, uma cópia do retângulos será criada.



Em seguida crie a difusão do transistor Pmos e do transistor Nmos. O  $w_p = 3u$  e o  $w_n = 2u$  devem ser respeitados. Selecione o difusor **DIFF drw** pressione R e use a régua para posicioná-los. De largura use **2,05u** que é o mínimo que precisamos para colocar todos os seus elementos internos. Lembrar que neste desenho o W do transistor corresponde a altura do mesmo.



\*\*\*\*\*DICAS\*\*\*\*\*

Alguns comandos úteis que podemos utilizar para fazer os desenhos são:

\*Pressionar “ESC” algumas vezes antes de usar a régua ou outra ferramenta para não ter nada em uso ou nada selecionado.

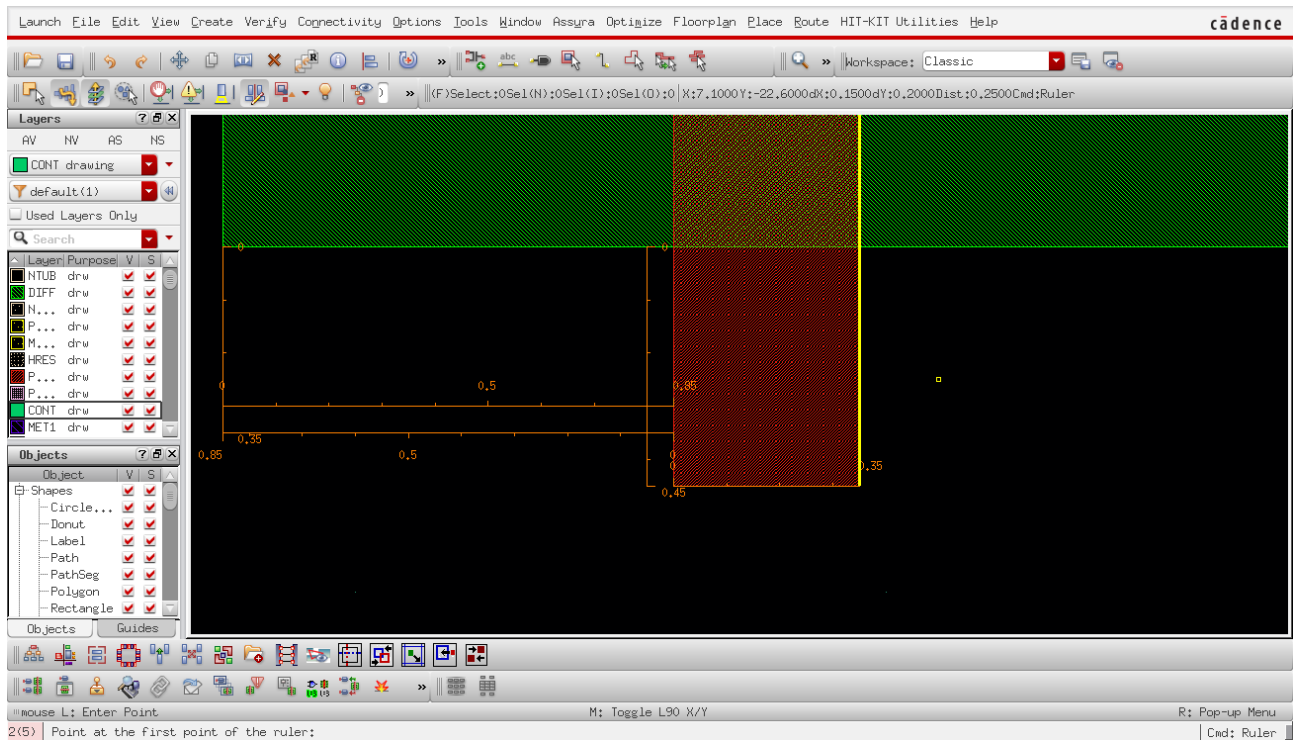
\*Os comandos “Move” para mover, “Stretch” para modificar o tamanho do elemento já inserido na tela, “Delete” para deletar alguns objeto, “Undo” para desfazer o último, “Zoom+” , “Zoom-”

\*E para limpar as régulas:

Window → Clear All Rulers

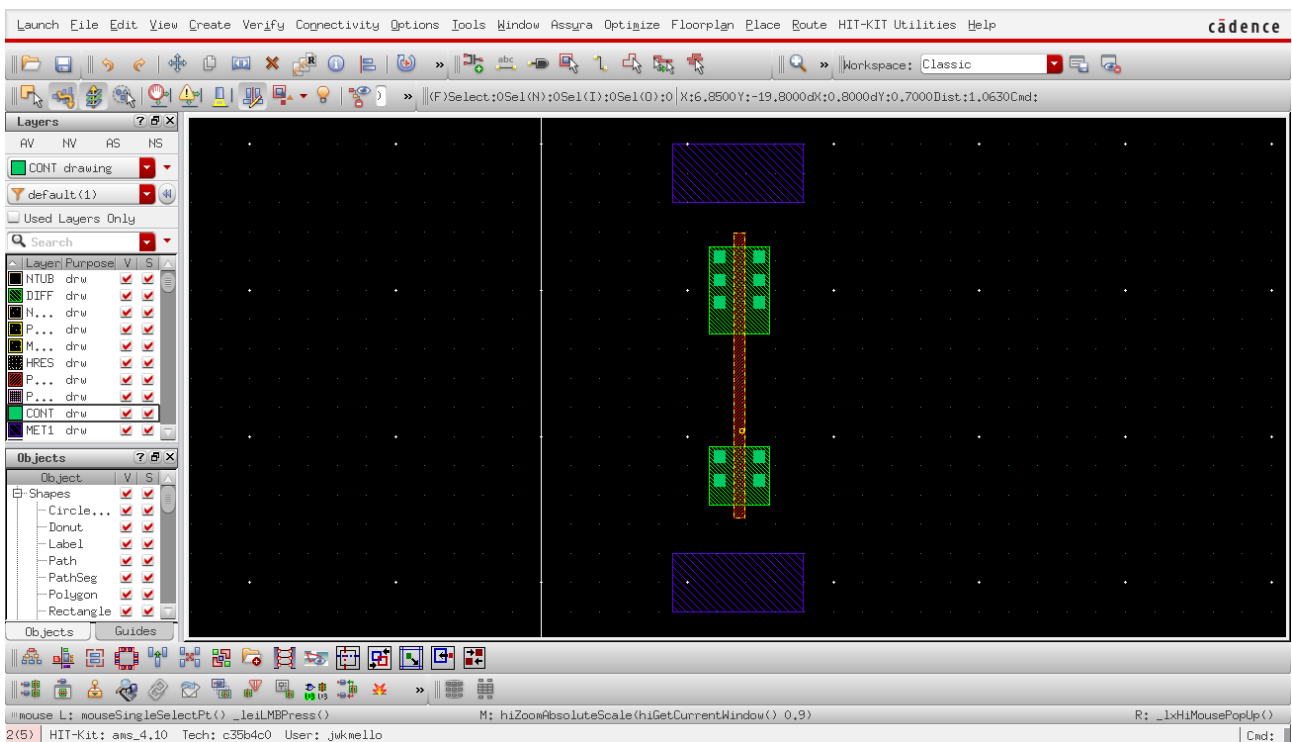
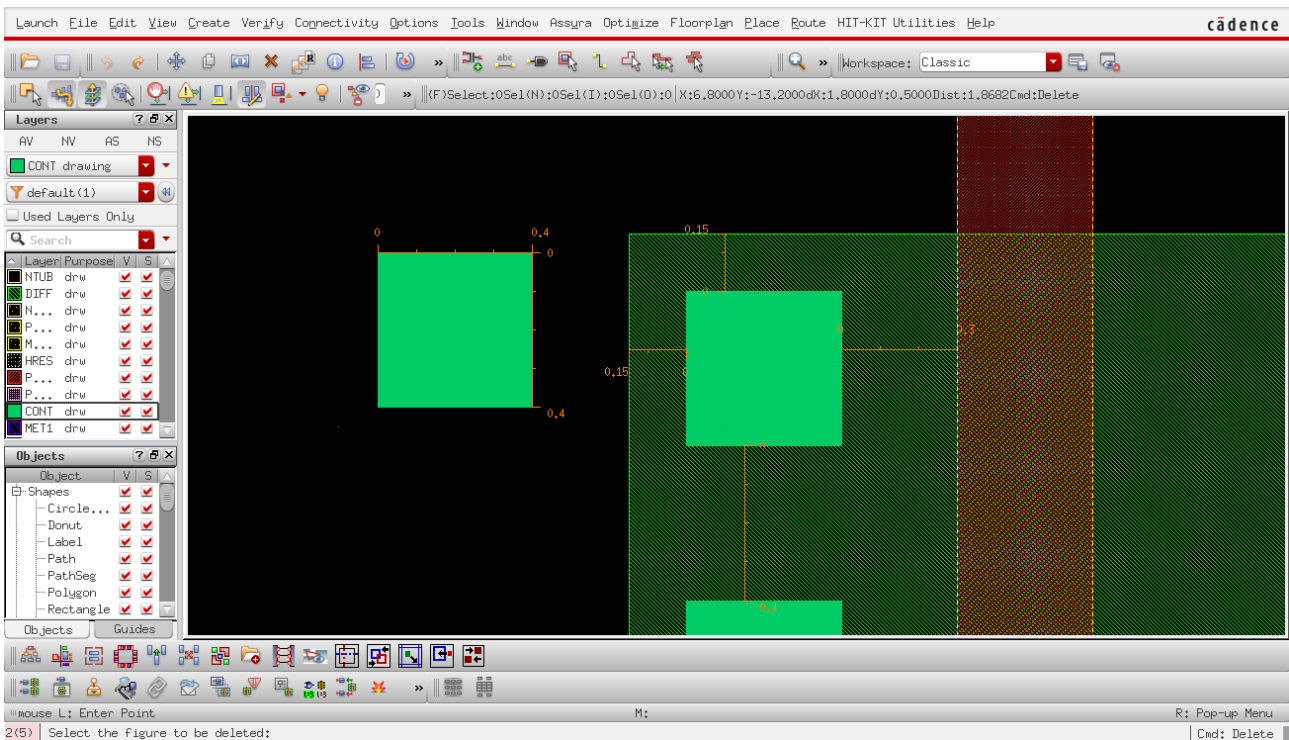
\*\*\*\*\*DICAS\*\*\*\*\*

Agora colocaremos POLY1 que deve passar pelo centro das difusões, deve ter uma largura mínima de 0,35u e deve ultrapassar as difusões em 0,4u..

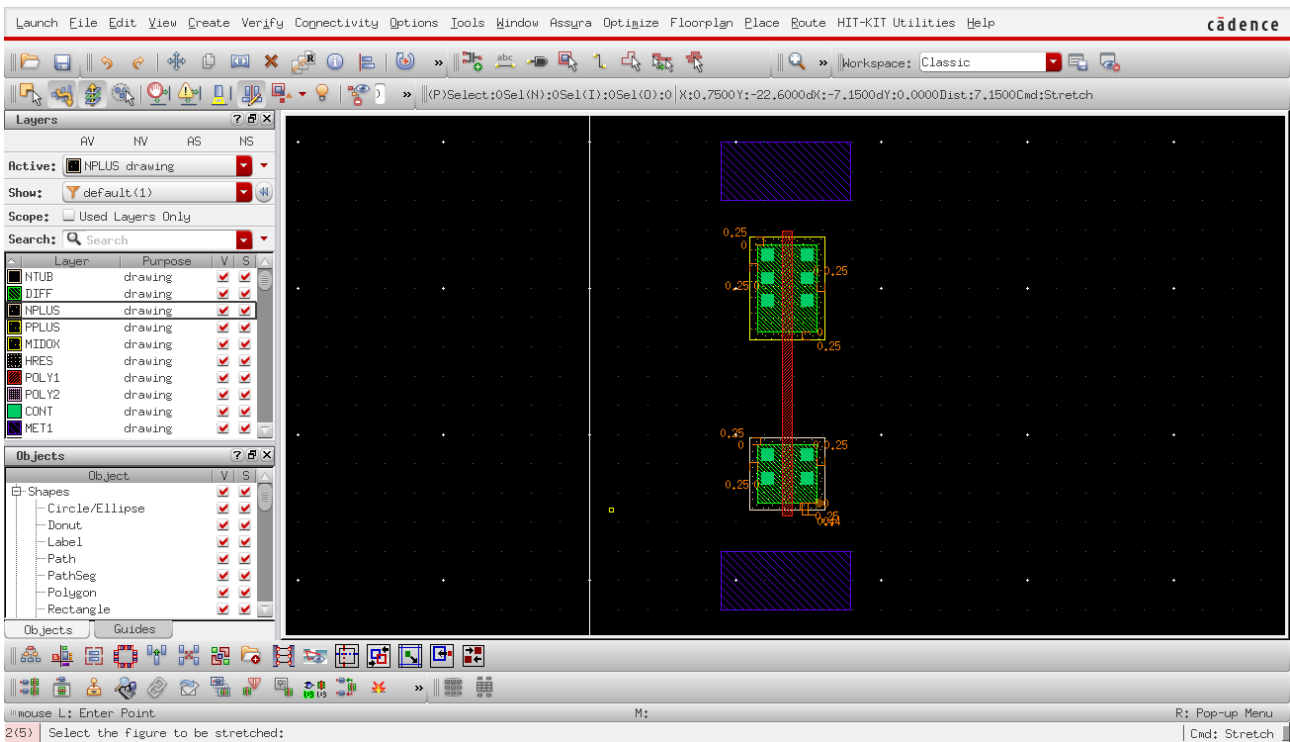


Feito isso chegamos na parte mais aguardada do layout a construção dos contatos. Para isso selecione a layer “CONT”. Os contatos devem ter uma largura fixa de 0,4u e um comprimento fixo de 0,4u.

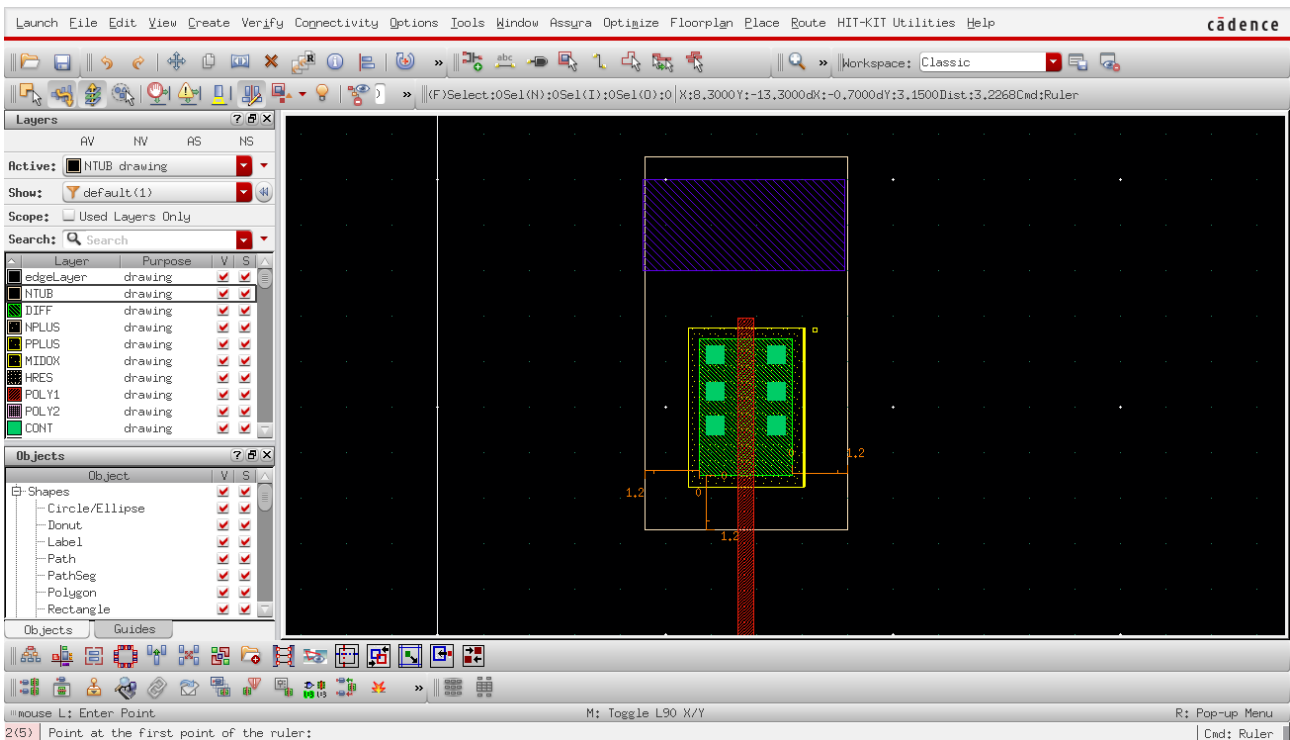
Eles também devem estar afastados no mínimo 0,4u um do outro. Deve haver 0,15u entre ele e a borda da difusão e 0,3u entre ele e o poli. Respeitando estas regras coloque o máximo de contatos dentro das difusões.



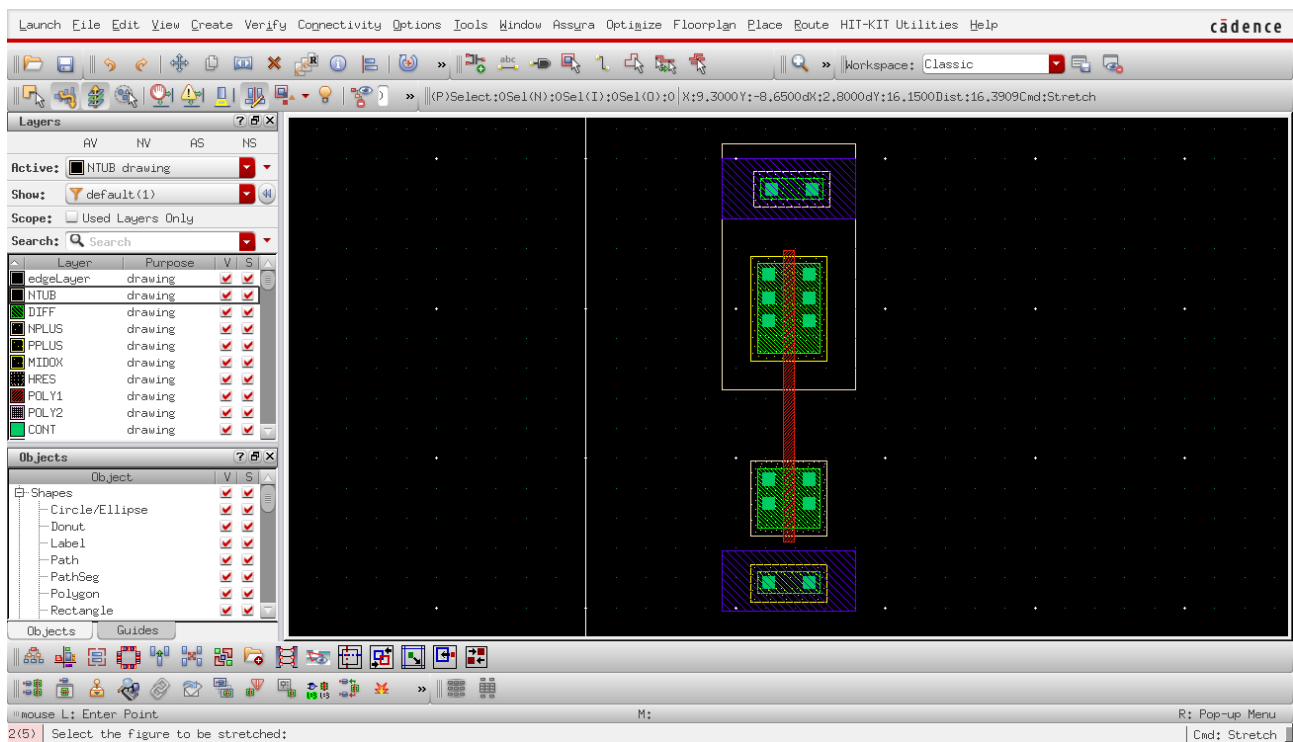
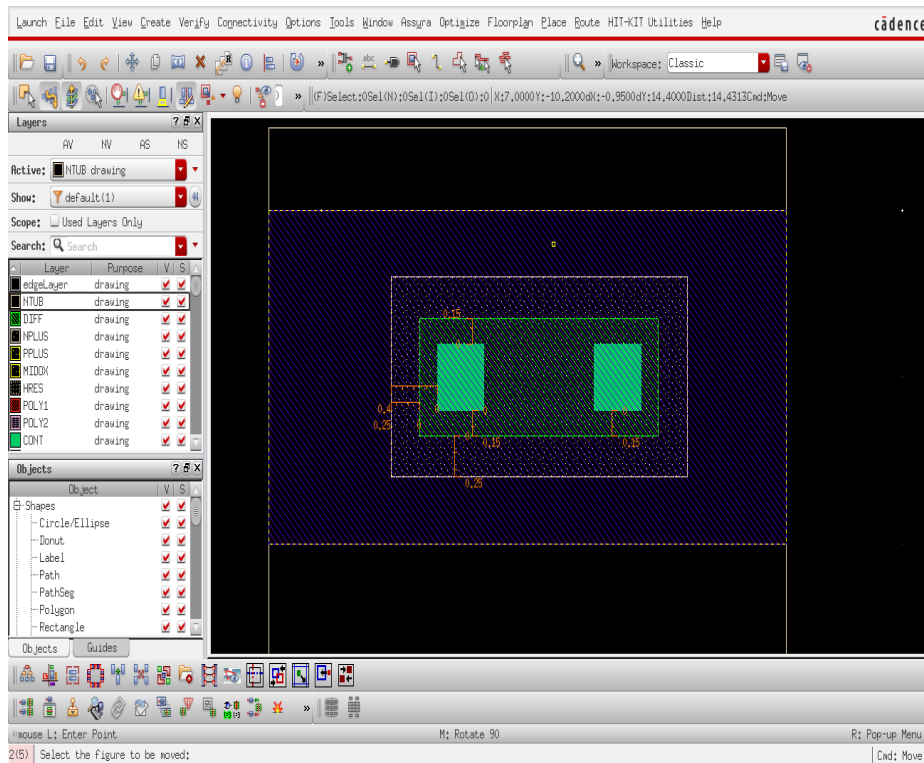
Neste momento faremos o poço N utilizando “NPLUS”. O nplus deve ficar afastado da difusão de 0,25u. Também faremos o poço P utilizando ”PPLUS” cuja regra é a mesma.



Agora faremos um poço “NTUB” para o transistor P , já que todo o inversor esta sobre um substrato do tipo P então da necessidade desse poço. O “NTUB” terá que ficar 1,2u da difusão.

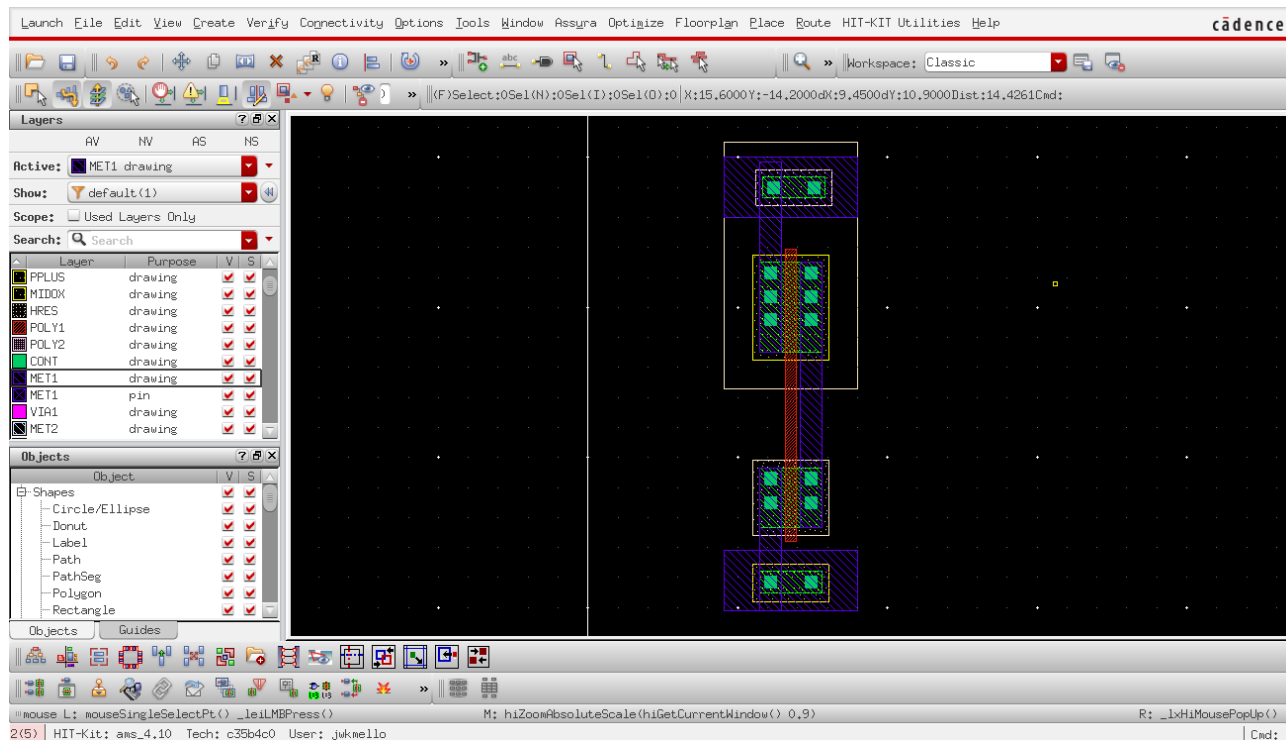


Então chegamos ao ponto de precisar fazer os poço n, com difusão e contados no VDD e o poço p, com difusão e contados no GND. Para acelerar o processo podemos usar o comando “Copy” e o “Stretch” (clique S) nos objetos que eu já foram inseridos.



Hora de adicionar as trilhas de metal ligando vdd e a difusão p , a difusão p e a difusão n , a difusão n e gnd.

A trilha deve ficar afastada da borda dos contatos no mínimo 0,15u e deve ter no mínimo 0,5u de largura e deve estar afastado no mínimo 0.45u de outra trilha de metal1.



Agora é hora de criar os pinos.

Connectivity → Update → Components and Nets...

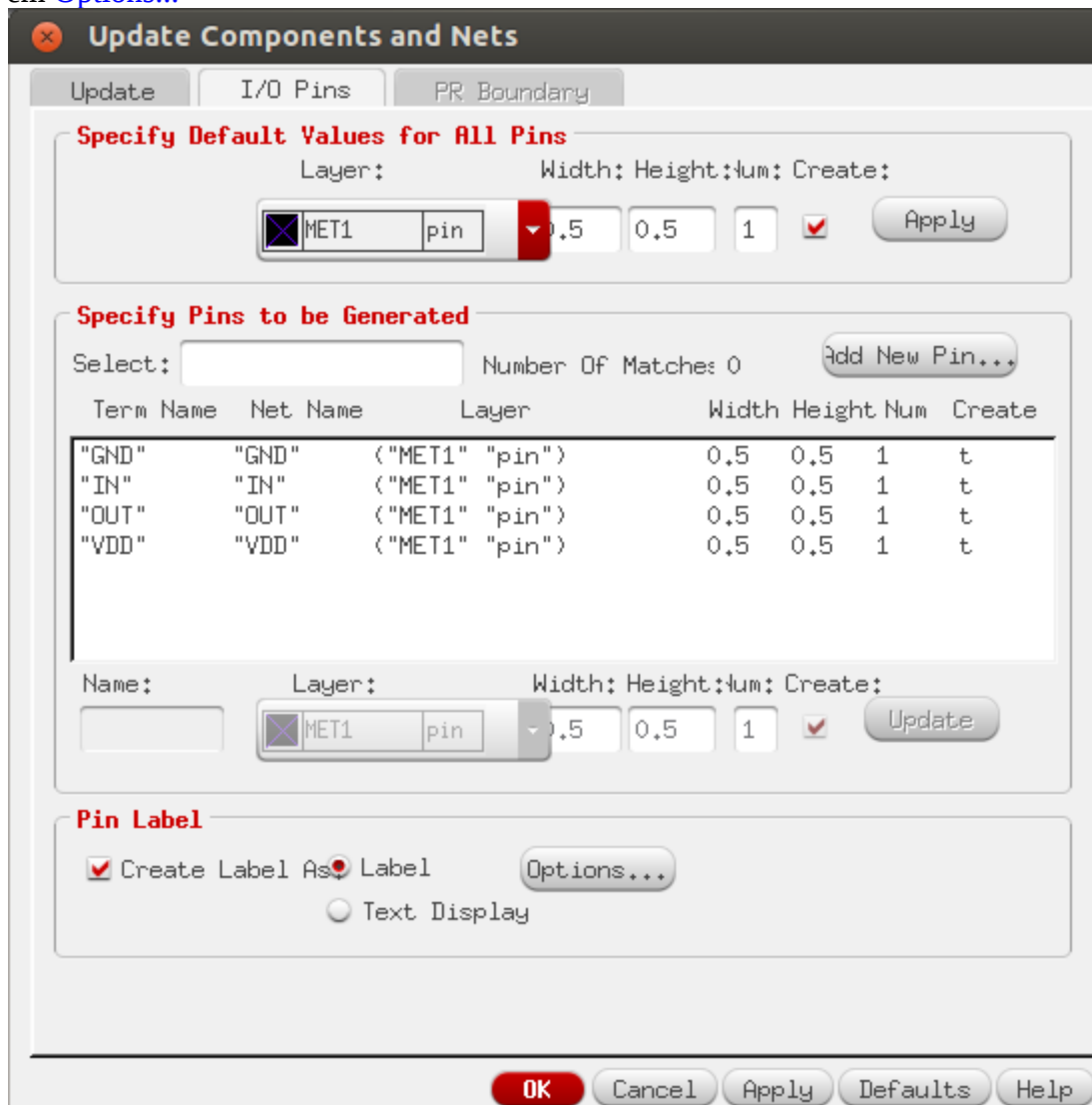
Desmarca as opções Instances e PR Boundary



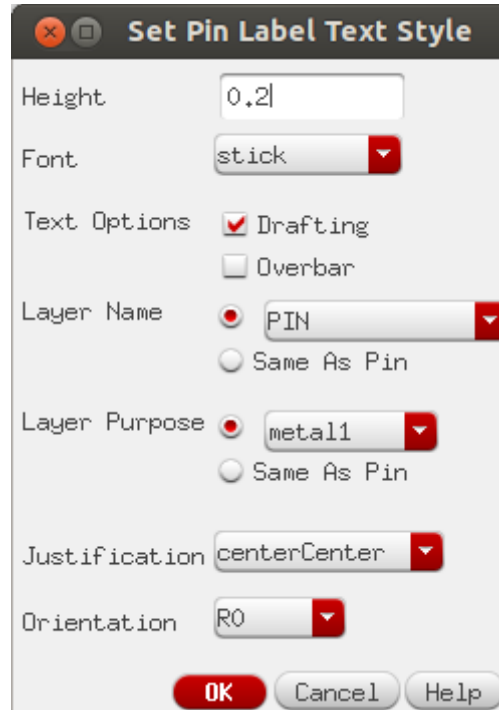
Na aba **I/O Pins**:

Marque a opção **Create Label As Label**

Clique em **Options...**



Height – 0.2  
Layer Name - PIN  
Layer Purpose - metal1



OK

OK

Então o esquemático deve se abrir , clique nos pinos e voltando o mouse para a tela de layout o pino aparecerá coloque cada pino só seu devido lugar.

Para cada pino deve-se fechar o esquemático e repetir o procedimento.

Como os pinos estão em Metal1 deve-se colocar um CONTATO entre o pino IN e o poly.

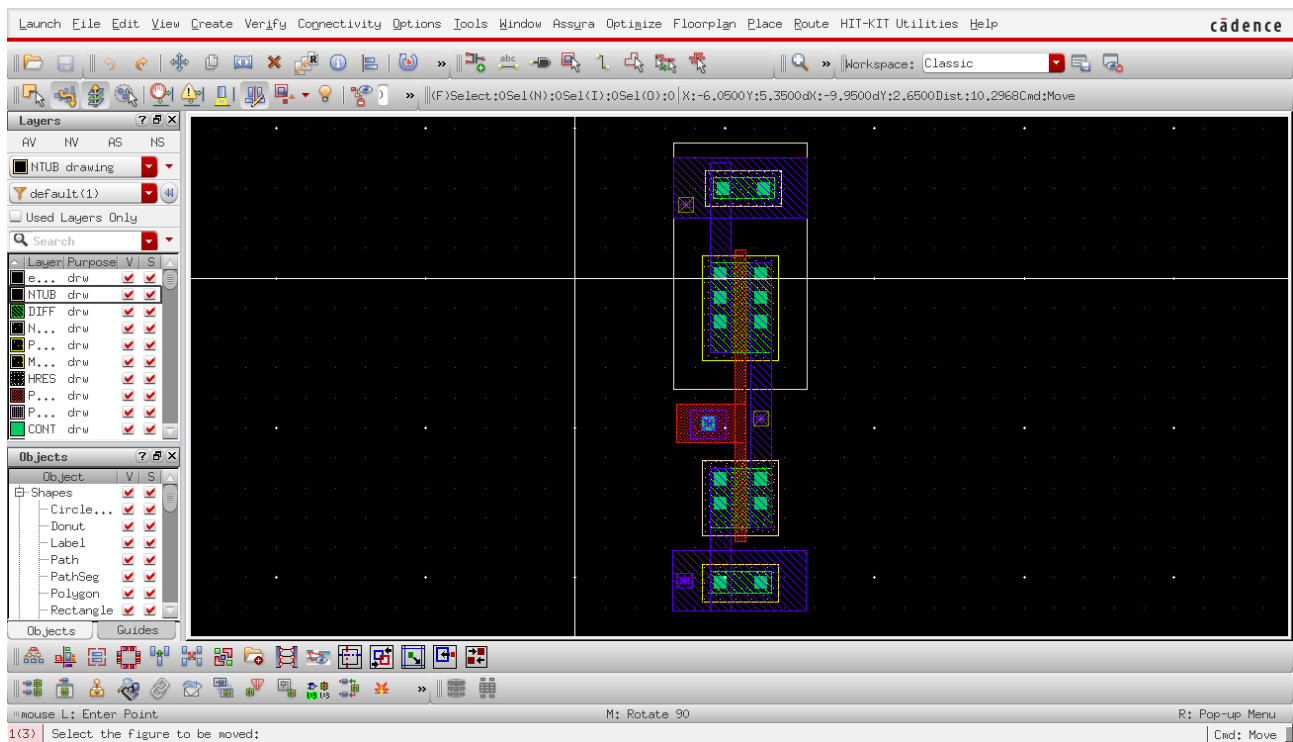
\*\*\*\*\*MUITO IMPORTANTE\*\*\*\*\*

Para colocar o pino de IN é necessário colocar metal1 e um contato entre ele e o poly e encima deles é que se ponhe o pino de IN.

Os demais pinos basta largar encima da trilha de metal1.

\*\*\*\*\*MUITO IMPORTANTE\*\*\*\*\*

Por fim o inversor ficou pronto:



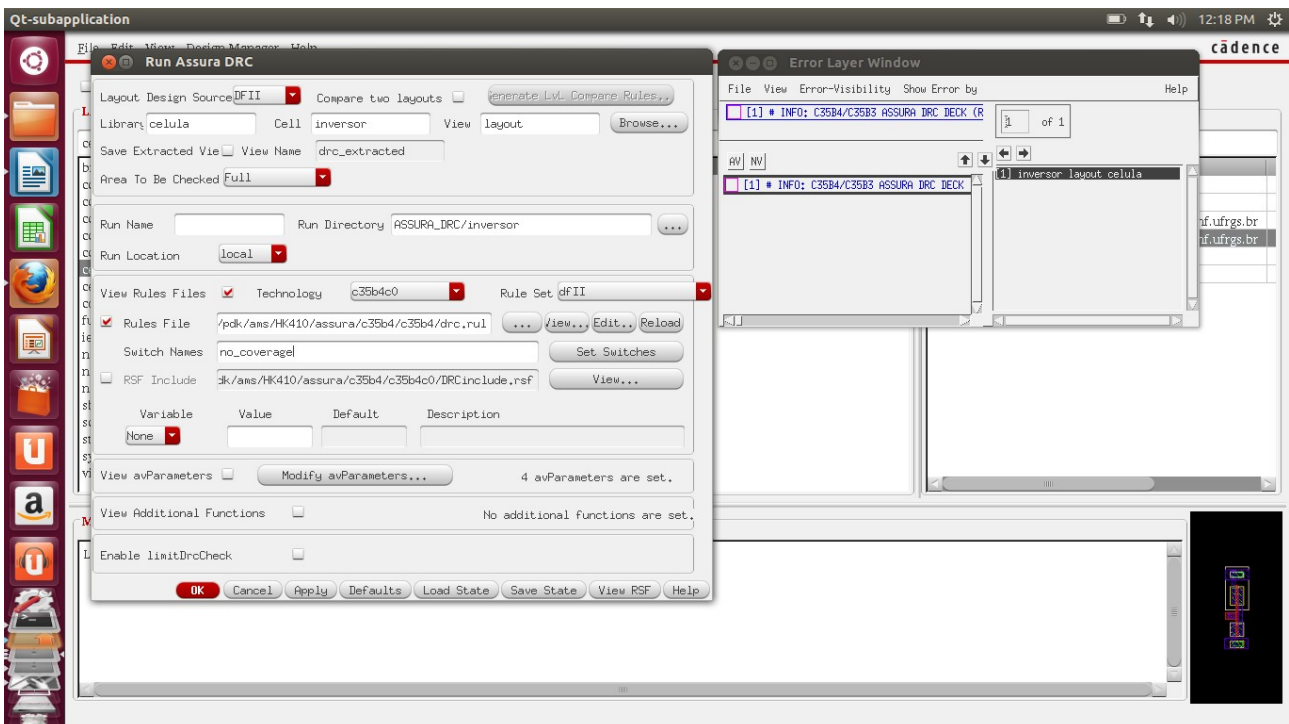
## VERIFICANDO O LAYOUT E EXTRAINDO OS PARASITAS:

Agora veremos se ele não possui nenhum erro de violação as regras:

Assura → Run DRC...

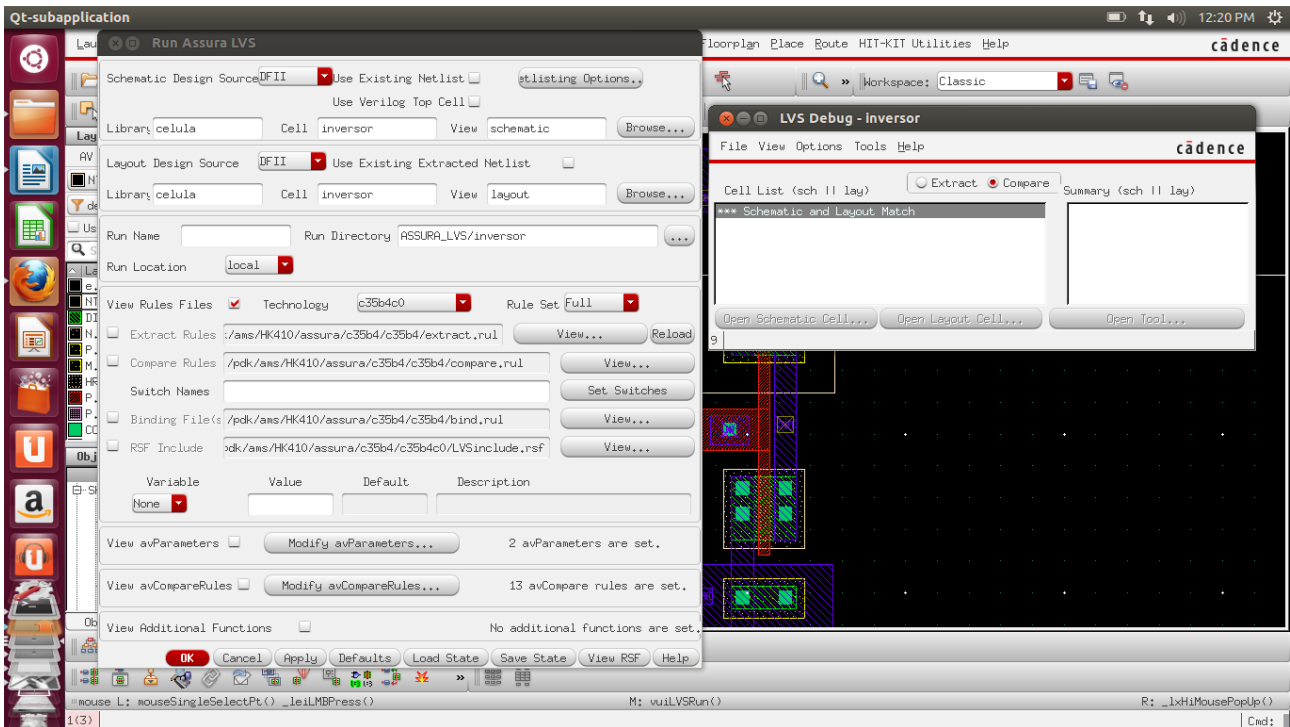
Em “Switch Names”, pressione “Set Switches” e escolha a opção “no\_coverage”

OK



Se houver algum erro ele será mostrado na janela a direita e deverá ser corrigido, neste caso não houve nenhum erro.

Assura → Run LVS



Se o passar no LVS, devemos rodar o LVS de novo com a opção

**Switch Names - resimulate\_extracted**

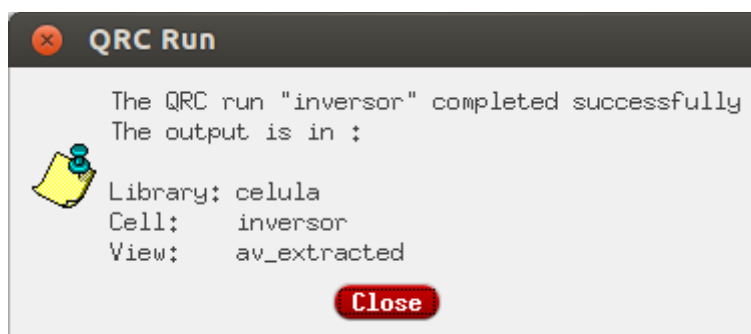
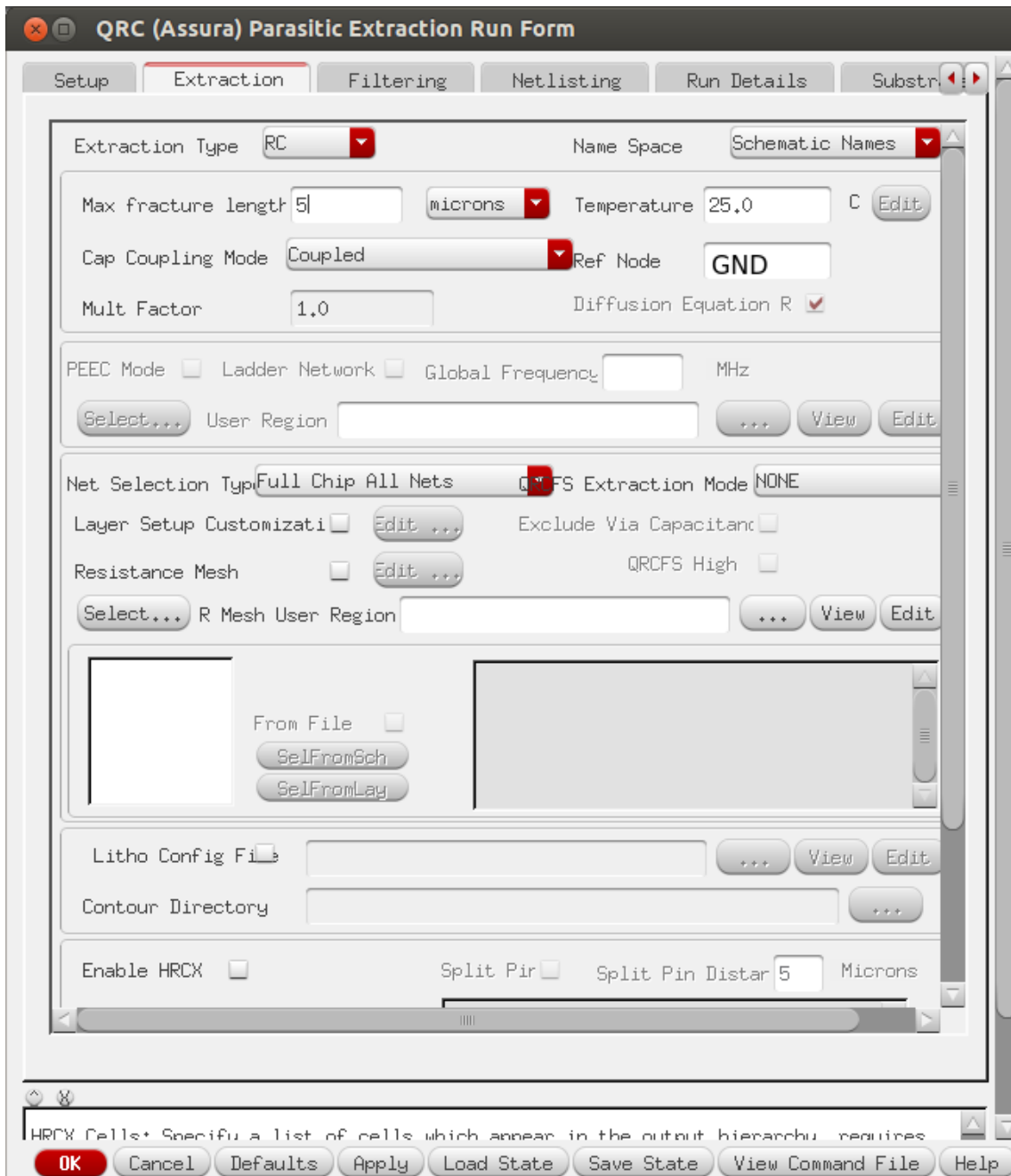


Agora devemos rodar o QRC para a extração dos parasitas:

Assura → Run QRC

Na aba **Extraction**  
**Ref Node - GND**  
**Extraction Type – RC**  
**Max fracture length - 5**

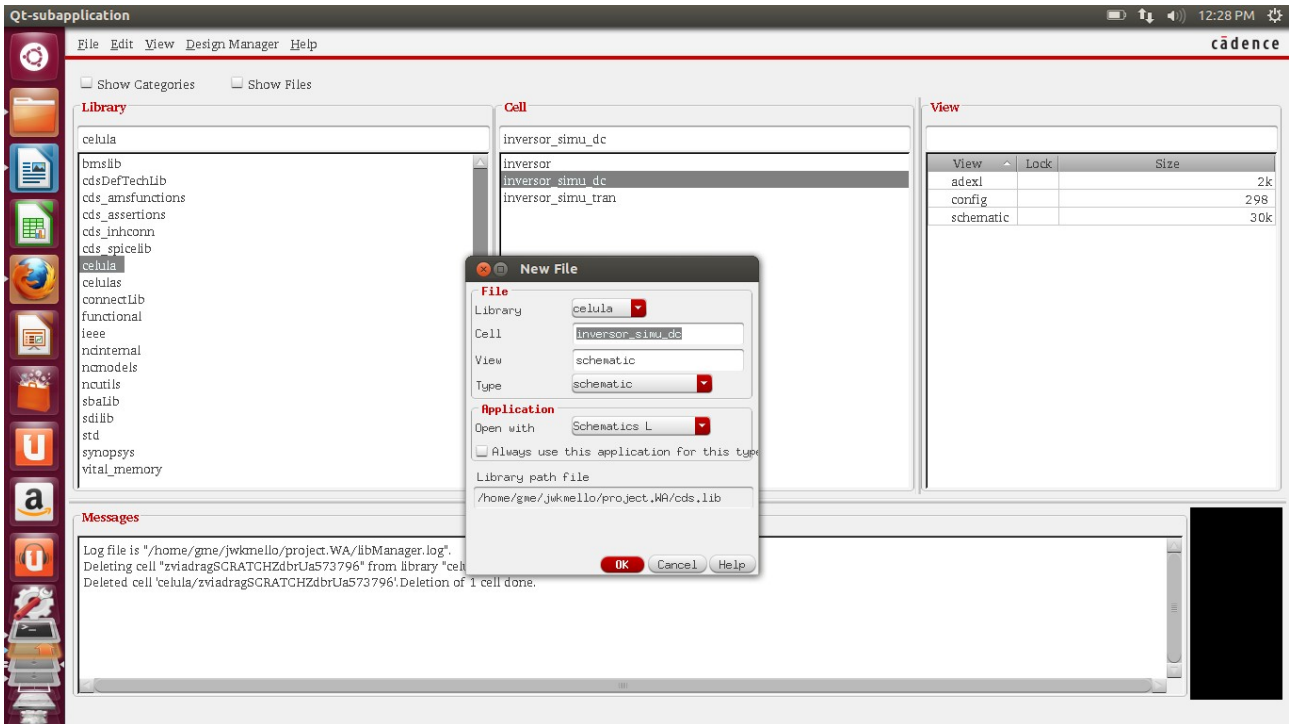
OK



Agora devemos rodar todas as simulações de novo usando o extraído:

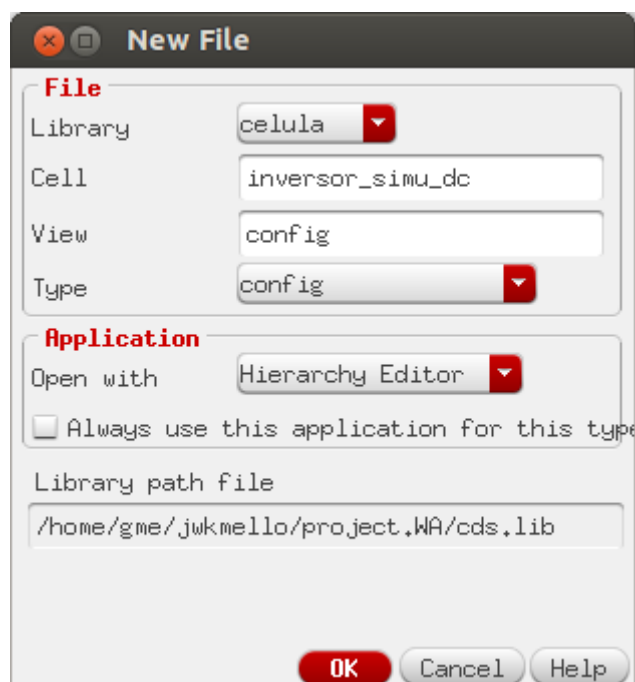
Para isso selecione o esquemático da simulação DC no Library Manager e:

**File → New → Cell View...**



**Type – config**

**OK**

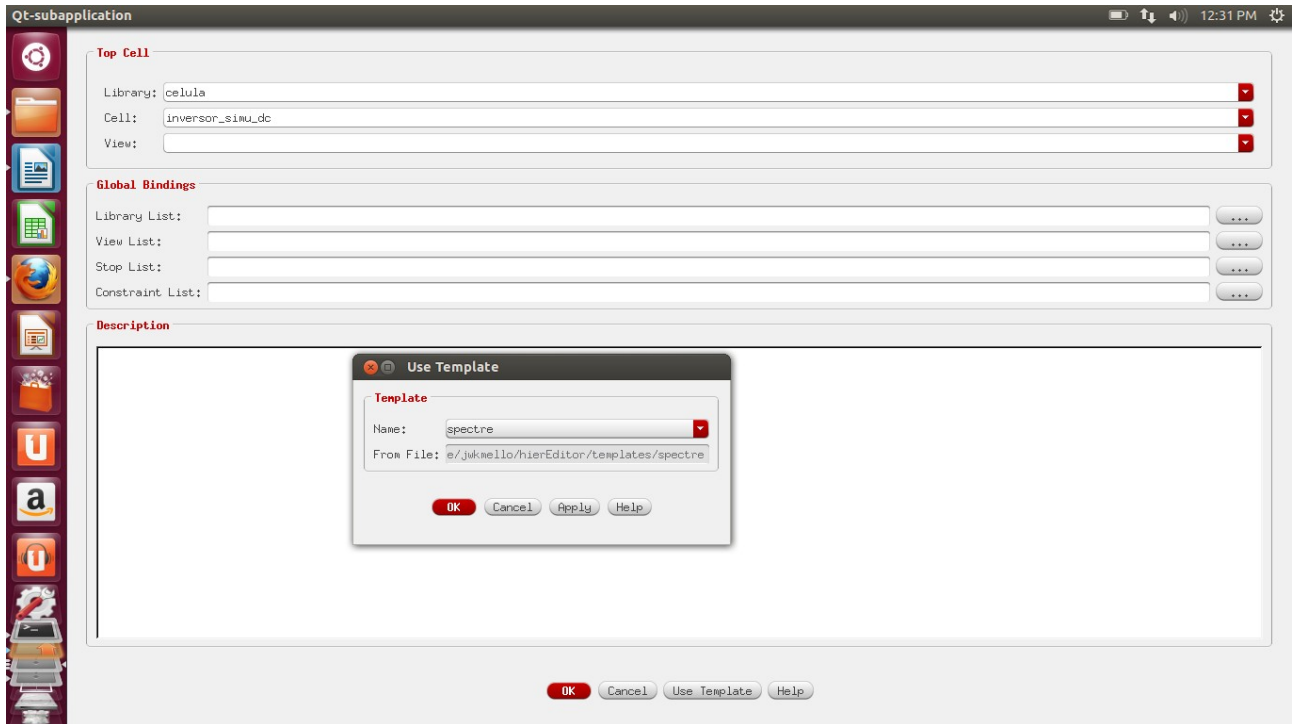


Na janela que abriu clique em [Use Template](#)

Selecione a opção [spectre](#).

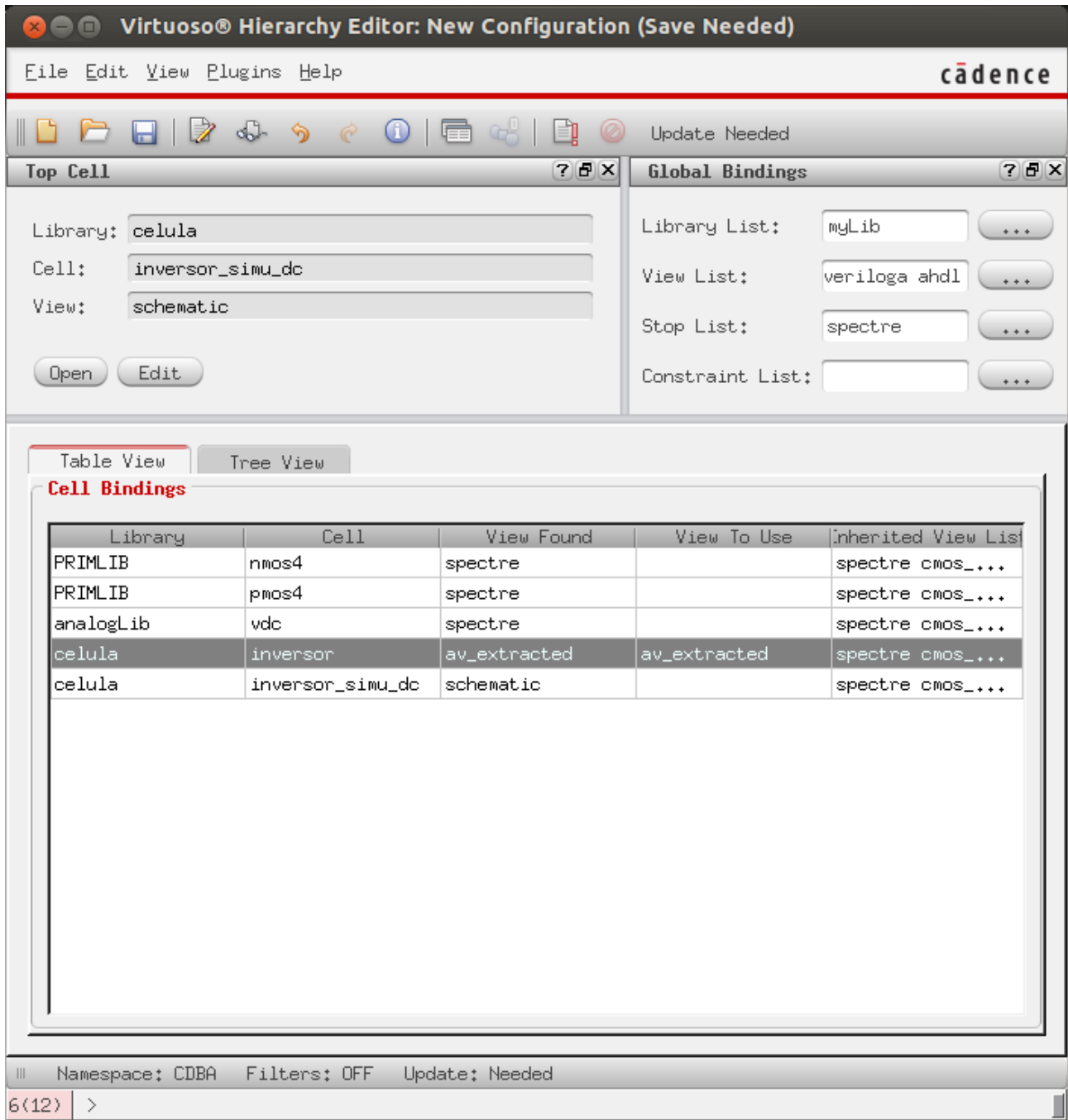
OK

OK



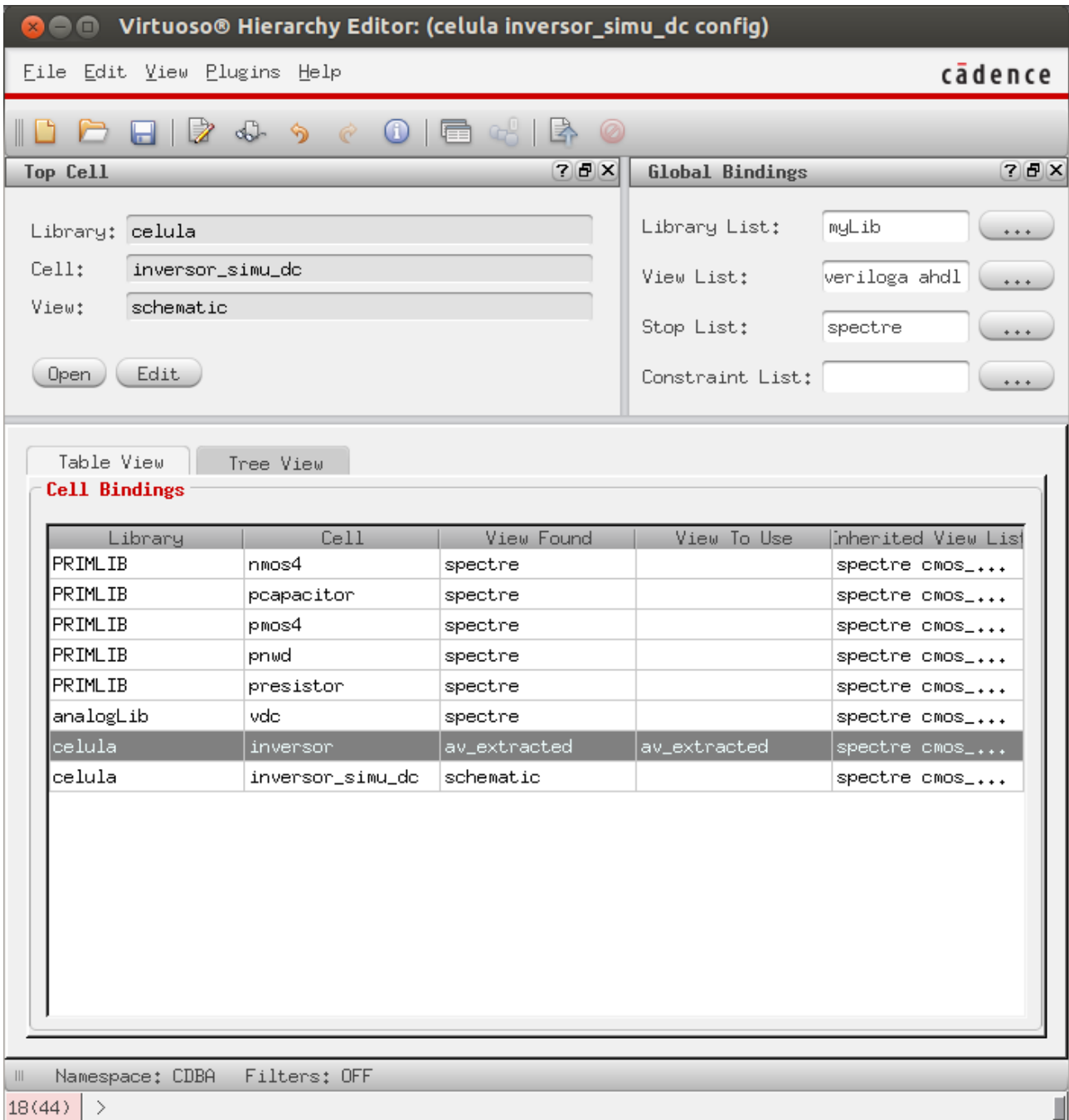
Clique com o botão direito em [celula inversor](#)

Set Cell View → [av\\_extracted](#)



Clique em **SALVAR**. MUITO IMPORTANTE TEM QUE SALVAR ANTES

Clique em **Open** na janela **Top Cell**



Pronto agora é só resimular seu circuito.

## RESULTADOS FINAIS

### RESULTADOS DO ESQUEMÁTICO:

1)

Margens de ruído:

$$MRh = V_{oh} - V_{ih} = 3.037 - 1.639 = 1.398 \text{ V}$$

$$MRI = V_{il} - V_{ol} = 1.0515 - 0.2849 = 0.7666 \text{ V}$$

2)

$$t_{phl} = 158.18\text{p} - 112.62\text{p} = 45.56 \text{ ps}$$

$$t_{plh} = 2.7483\text{n} - 2.6916\text{n} = 0.0566\text{n} = 56.6 \text{ ps}$$

$$t_p = (t_{phl} + t_{plh}) / 2 = (45.56 + 56.6) / 2 = 51.08\text{ps}$$

$$T_{fall} = 190.04\text{p} - 129.09\text{p} = 60.95\text{ps}$$

$$T_{rise} = 2.814\text{n} - 2.7134\text{n} = 0.1006\text{n} = 100.6\text{ps}$$

3)

A potência é: 36.80uW

4)

Energia = 0.183pJ

### RESULTADOS DO EXTRAÍDO:

1)

Margens de ruído:

$$MRh = V_{oh} - V_{ih} = 3.037 - 1.639 = 1.398 \text{ V}$$

$$MRI = V_{il} - V_{ol} = 1.050 - 0.2867 = 0.7633\text{V}$$

2)

$$t_{phl} = 178.47\text{p} - 122.6\text{p} = 55.87\text{ps}$$

$$t_{plh} = 2.7682\text{n} - 2.6985\text{n} = 0.0697\text{n} = 69.7\text{ps}$$

$$t_p = (t_{phl} + t_{plh}) / 2 = (55.87 + 69.7) / 2 = 62.78\text{ps}$$

$$T_{fall} = 218.12\text{p} - 142.13\text{p} = 75.99\text{ps}$$

$$T_{rise} = 2.8489\text{n} - 2.7251\text{n} = 0.1238\text{n} = 123.8\text{ps}$$

3)

A potência é: 44.72uW

4)

Energia = 0.223pJ