

Tutorial da Ferramenta Magic: Layout de Circuitos Integrados Digitais e Verificação LVS

LUIZ FELIPE RODRIGUES COSTA – 2022009042
NATAN FERREIRA ROSA DE JESUS VAZ - 2020019620

Universidade Federal de Itajubá – Engenharia de Computação

16 de julho de 2025

Resumo

Este relatório apresenta um tutorial sobre o uso da ferramenta Magic, um software de código aberto para o design e layout de circuitos integrados digitais. O objetivo é auxiliar os alunos na elaboração dos layouts através do processo de criação dentro da ferramenta Magic, abordando desde os comandos fundamentais de desenho até as conexões de camadas. Será também citado como fazer o procedimento de verificação LVS (Layout Versus Schematic), demonstrando como utilizar o Magic para comparar o layout físico com o esquemático, concluindo a integridade e a correção funcional do projeto.

Sumário

1	Introdução	4
1.1	Objetivos	4
2	Fluxo de Trabalho no Magic: Passo a Passo	4
2.1	Ambiente e Navegação Visual	4
2.1.1	Inicialização a partir de um arquivo SPICE	4
2.1.2	Comandos de Visualização	6
2.2	Edição e Manipulação de Objetos	16
2.2.1	Seleção de Elementos	16
2.2.2	A Caixa (Box) e o Cursor: Ferramenta Fundamental de Edição	18
2.2.3	Comandos de Modificação	21
2.2.4	Controle de Visibilidade e Histórico	22
3	Resumo de Atalhos	24
4	Camadas e Construção do Layout Físico	25
4.0.1	Camadas de Layout	26
4.0.2	Interconexões: Metais, Contatos e Vias	26
5	Introdução à Criação de <i>Layout</i>	27
6	Erros de DRC	39

1 Introdução

O *Magic VLSI Layout Tool* é um editor de layout *open-source* amplamente utilizado em disciplinas de eletrônica para o desenho físico de circuitos integrados. Neste tutorial, mostramos passo a passo como partir de uma ideia e chegar à verificação *Layout Versus Schematic* (LVS), assegurando que o layout físico reflete fielmente o circuito projetado.

1.1 Objetivos

Através deste tutorial o leitor deverá ser capaz de:

- Criar e organizar células (*cells*) no *Magic*;
- Desenhar, manipular e conectar elementos do layout;
- Executar a verificação de regras de desenho (DRC);
- Extrair o netlist SPICE e LVS.

2 Fluxo de Trabalho no Magic: Passo a Passo

2.1 Ambiente e Navegação Visual

A primeira etapa é configurar o ambiente e carregar o projeto. A seguir, mostramos como iniciar o trabalho de forma prática, importando um netlist SPICE que já descreve o circuito.

2.1.1 Inicialização a partir de um arquivo SPICE

Este método cria automaticamente as portas (ports) e as instâncias dos dispositivos na janela de layout, servindo como um guia para o desenho. O processo é feito em quatro passos principais.

Passo 1: Acessar a função de importação Com o Magic aberto, o primeiro passo é acessar o menu ‘File > Import SPICE’, como destacado na Figura 1.

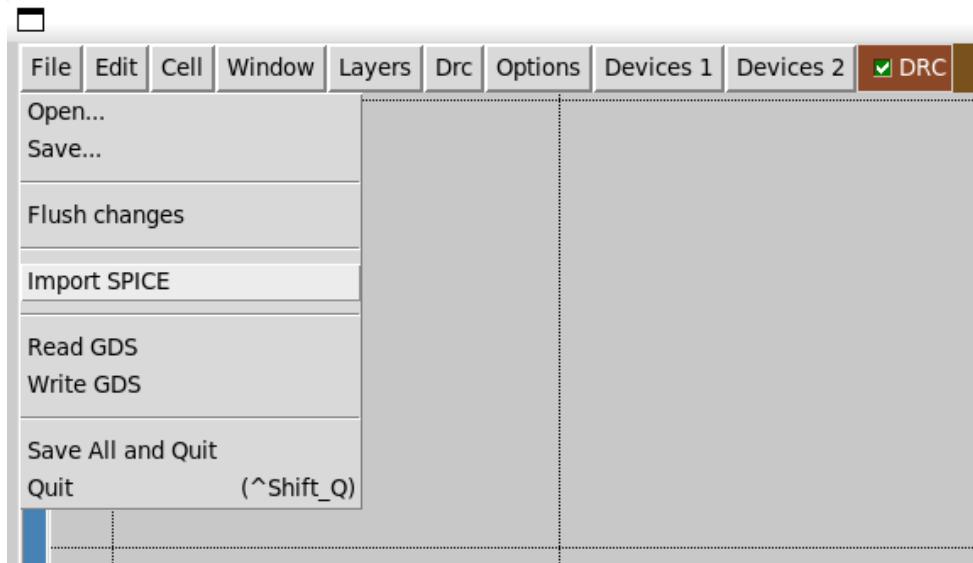


Figura 1: Acessando a funcionalidade de importação de SPICE no menu principal.

Passo 2: Navegar até o diretório do projeto Após a seleção, uma janela de navegação de arquivos será aberta. Utilize-a para encontrar e acessar a pasta onde o seu arquivo de simulação ‘.spice’ está localizado, como pode ser visto na Figura 2.

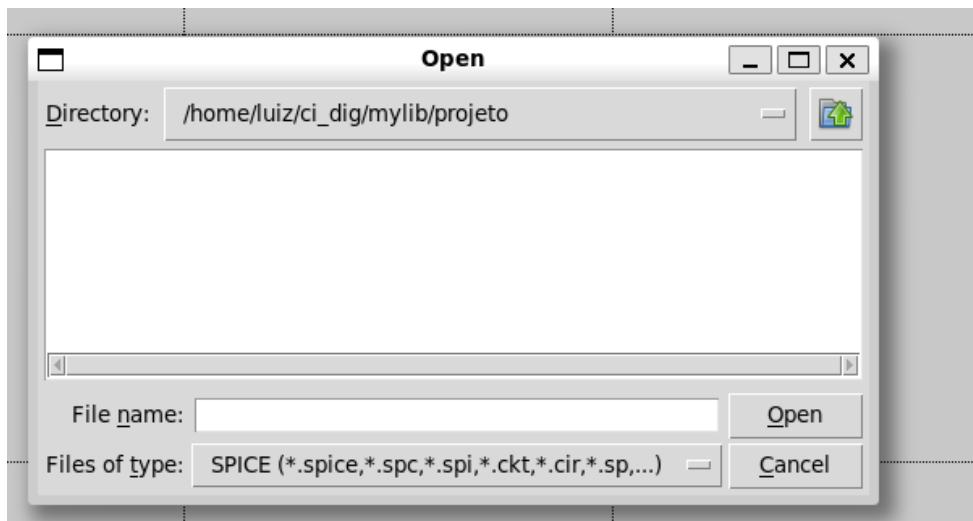


Figura 2: Navegando entre as pastas do sistema para encontrar o netlist.

Passo 3: Selecionar o arquivo Uma vez no diretório correto, selecione o arquivo ‘.spice’ que corresponde ao seu circuito e prossiga, como mostra a Figura 3.

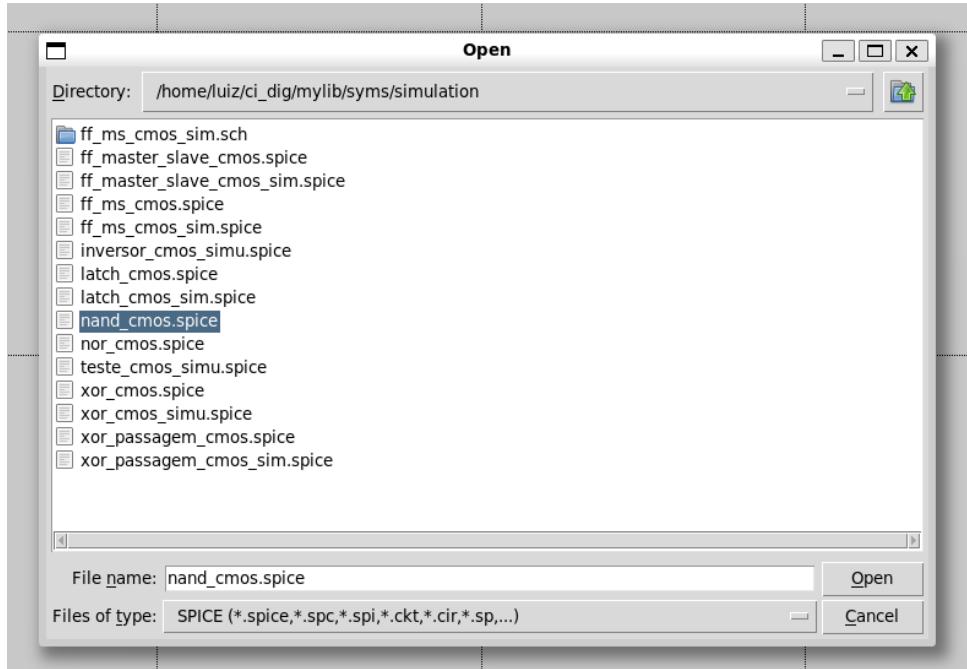


Figura 3: Seleção do arquivo ‘.spice’ para ser carregado no Magic.

Passo 4: Projeto aberto e pronto para o layout O Magic irá processar o netlist e abrirá a célula com todos os transistores e portas já instanciados (sem posição ou roteamento definidos). O projeto agora está pronto para o início do trabalho de desenho do layout (Figura 4).

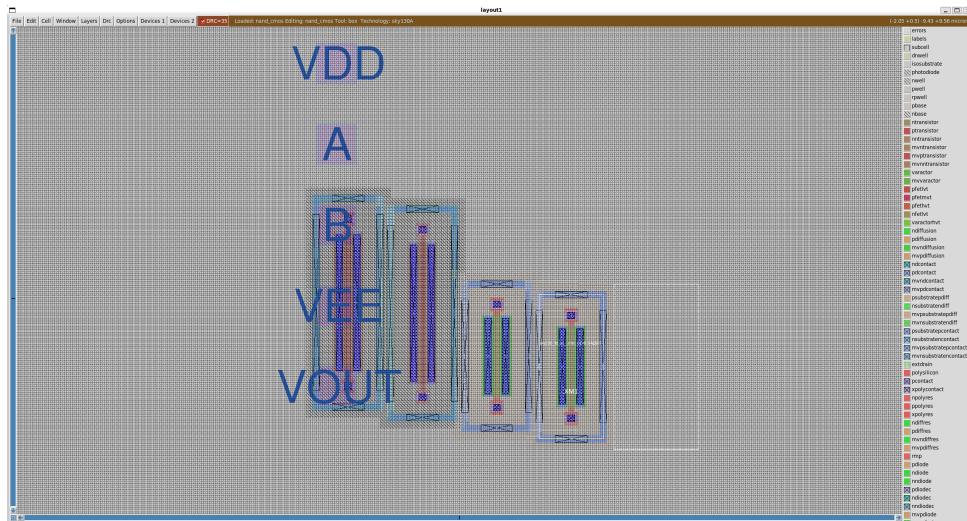


Figura 4: Layout importado com sucesso, exibindo os dispositivos e portas.

2.1.2 Comandos de Visualização

Para trabalhar de forma eficiente, é fundamental dominar os comandos que controlam a aparência e a visibilidade do layout. A seguir, detalhamos os principais.

Zoom O Magic oferece diversos atalhos de teclado para controlar o zoom de forma rápida e precisa, permitindo inspecionar detalhes ou ter uma visão geral do layout.

Para aproximar a visualização (Zoom In), posicione o cursor do mouse sobre a área de interesse e pressione a tecla **z**. Cada toque na tecla aumentará o nível de zoom, como mostrado na Figura 5.

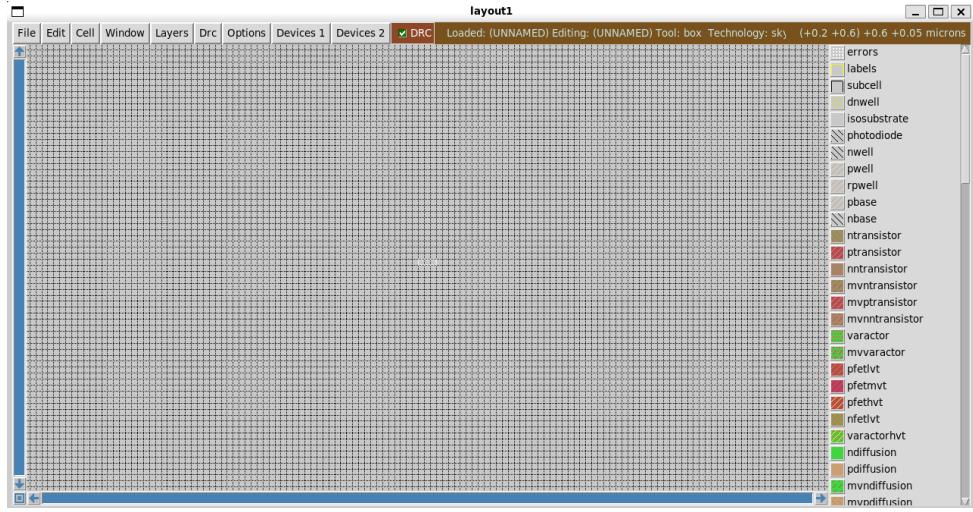


Figura 5: Aplicando zoom de aproximação (Zoom In) com a tecla 'z'.

Para afastar a visualização (Zoom Out) e ter uma visão mais ampla do layout, utilize a combinação de teclas **Shift + z**. Isso diminui o nível de zoom a cada toque, conforme ilustrado na Figura 6.

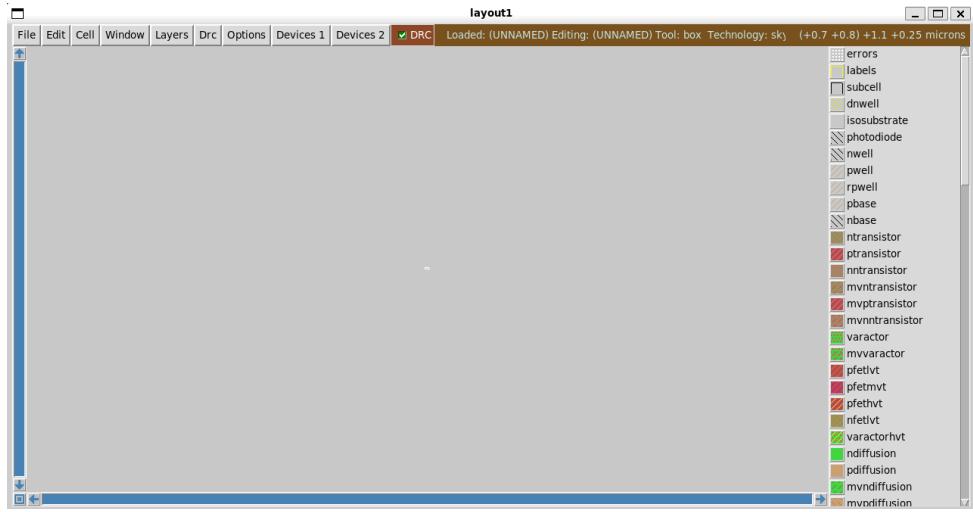


Figura 6: Aplicando zoom de afastamento (Zoom Out) com 'Shift + z'.

Um dos comandos mais úteis é o **Ctrl + z**. Ele centraliza a tela na posição exata do cursor, permitindo que você se move rapidamente para uma área específica e a inspecione com mais detalhes, como demonstrado na Figura 7.

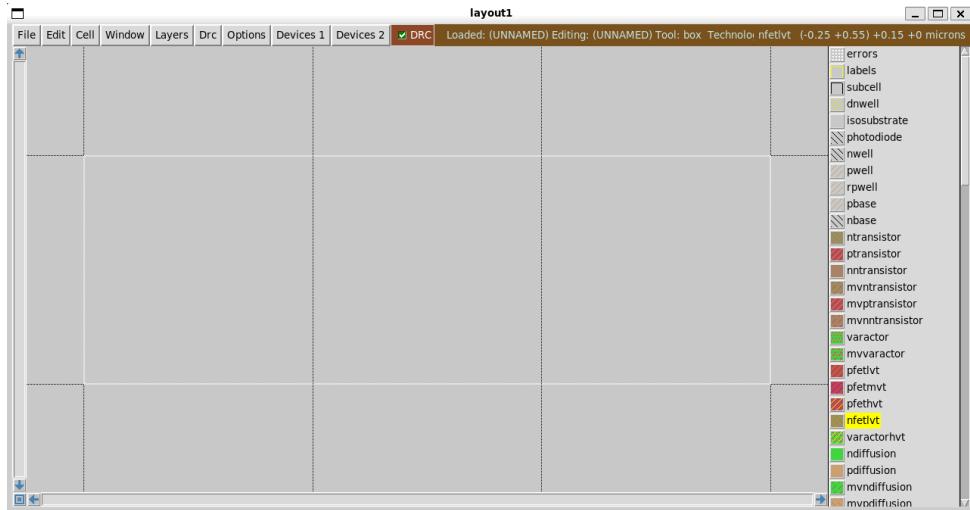


Figura 7: Centralizando a visualização em um ponto de interesse com 'Ctrl + z'.

Grid (Grade) A grade (Grid) é uma ferramenta visual essencial para garantir o alinhamento e o dimensionamento precisos dos componentes do layout. Sua configuração no Magic envolve alguns passos simples, acessados principalmente pelo menu Window.

Passo 1: Acessar o menu de configuração O primeiro passo é acessar o menu de configurações da janela, localizado na barra superior, clicando em Window, como mostra a Figura 8.

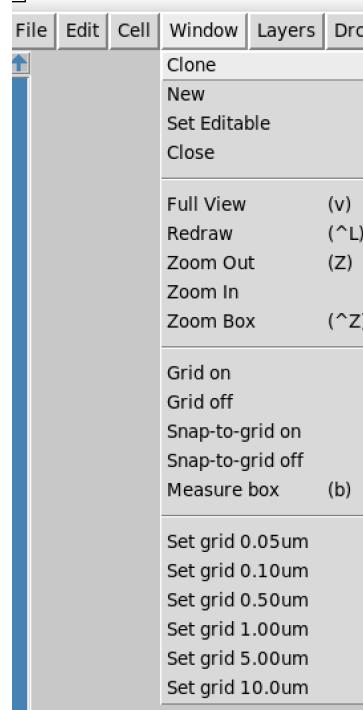


Figura 8: Acessando o menu 'Window' para iniciar a configuração da grade.

Passo 2: Ativar a visibilidade da grade Dentro do menu, selecione a opção Grid On para tornar a grade visível na área de trabalho. Este comando funciona como um interruptor para exibir ou ocultar a grade (Figura 9).



Figura 9: Selecionando a opção 'Grid On' para tornar a grade visível.

Passo 3: Habilitar o Snap to Grid Para garantir que todos os elementos desenhados se alinhem perfeitamente, é fundamental ativar a opção **Snap to Grid** (Figura 10). Isso força o cursor e as bordas dos objetos a se prenderem aos pontos da grade, evitando erros de posicionamento.

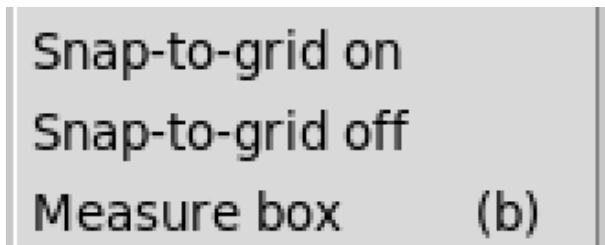


Figura 10: Ativando 'Snap to Grid' para garantir o alinhamento automático.

Passo 4: Definir as dimensões da grade A dimensão da grade pode ser ajustada através da opção **Set Grid**. Recomenda-se definir um espaçamento fino, como 0.05u, para um bom equilíbrio entre precisão e usabilidade (Figura 11).



Figura 11: Definindo o espaçamento da grade com o valor recomendado de 0.05u.

Passo 5: Resultado final Com todas as configurações aplicadas, a grade estará visível e funcional no layout, pronta para auxiliar no desenho preciso dos componentes, como pode ser visto na Figura 12.

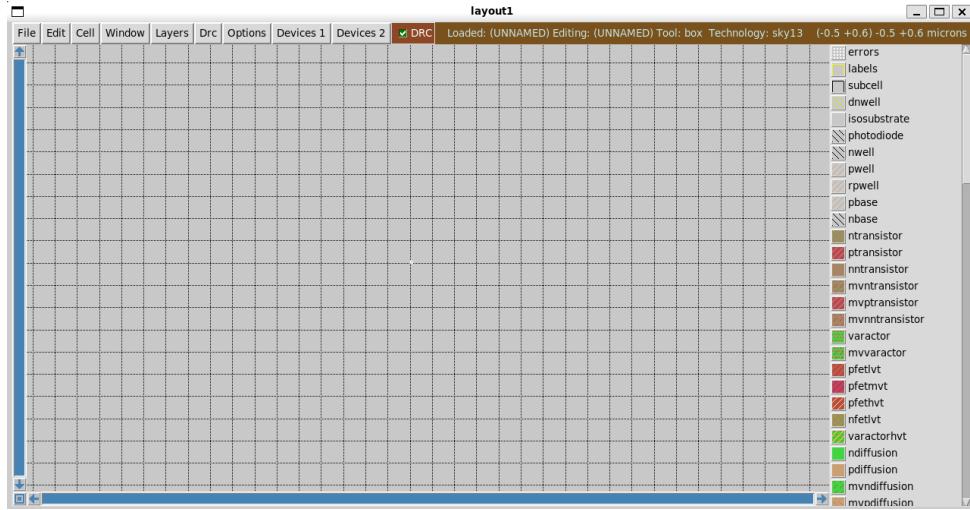


Figura 12: Resultado final: layout com a grade configurada e visível na área de trabalho.

Desenho e Pintura de Camadas (Comando Paint) Uma das tarefas mais fundamentais no Magic é o desenho das camadas que compõem o circuito. Isso é feito através do comando `paint`, que preenche uma área selecionada com a camada especificada.

Passo 1: Utilizar a janela de console As operações de inserção dos metais são executadas via comandos de texto. Para isso, utilizamos a janela de console (terminal) do Magic, onde os comandos são digitados, como indicado na Figura 13.

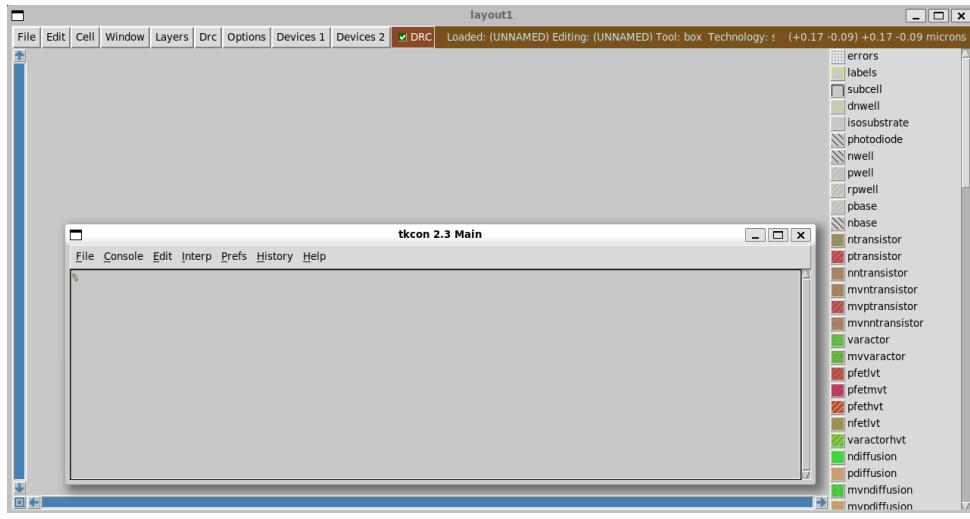


Figura 13: A janela de console do Magic, onde os comandos de texto são inseridos.

Passo 2: Selecionar a área a ser pintada Antes de executar o comando, é preciso definir a área no layout. Utilize o mouse para desenhar uma caixa de seleção sobre a região que você deseja preencher com a nova camada (Figura 14).

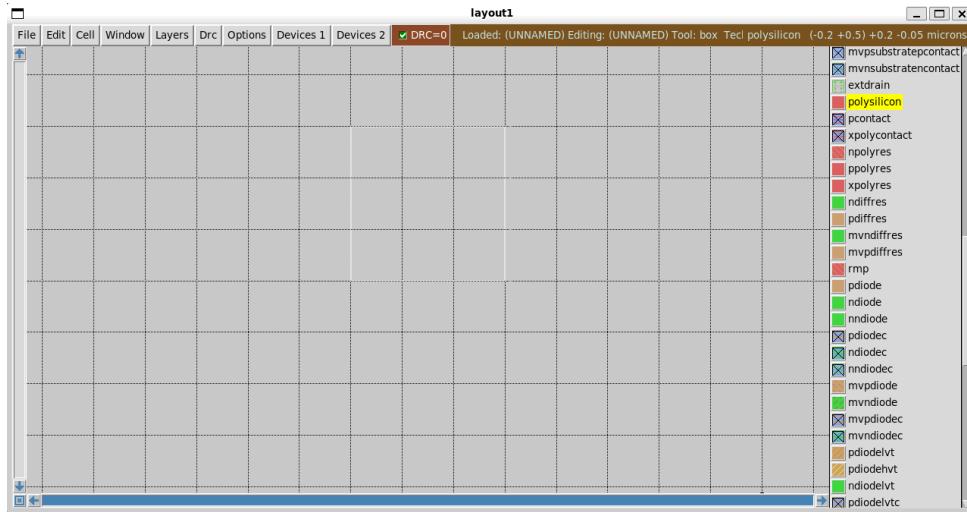


Figura 14: Selecionando uma área retangular no layout antes de aplicar o comando.

Passo 3: Digitar o comando de pintura Com a área selecionada, volte à janela de console e digite o comando `paint <nome_da_camada>`. Por exemplo, para pintar com polisilício, o comando é `paint poly`, como demonstrado na Figura 15.

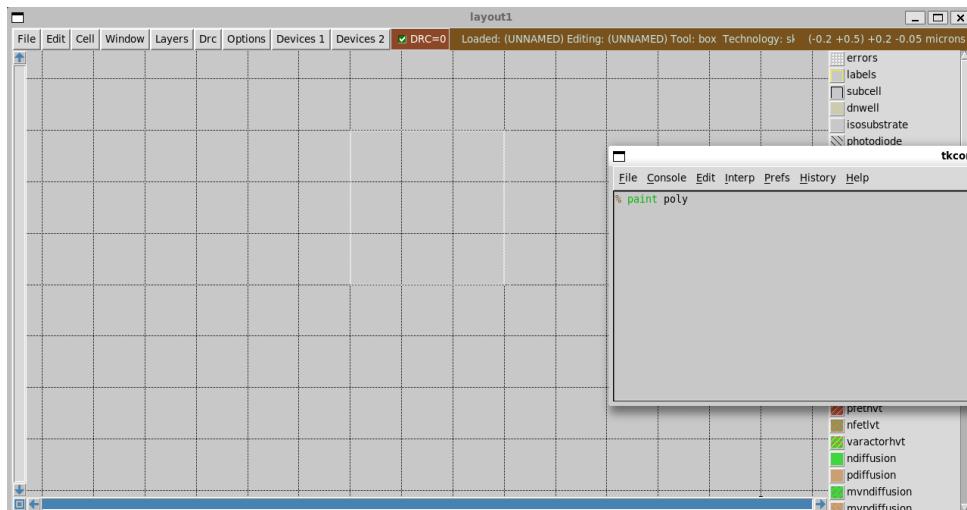


Figura 15: Digitando o comando 'paint poly' no console para preencher a área.

Passo 4: Visualizar o resultado Após executar o comando, a área previamente selecionada será preenchida com a camada especificada. O resultado é visível imediatamente na janela de layout, como mostra a Figura 16.

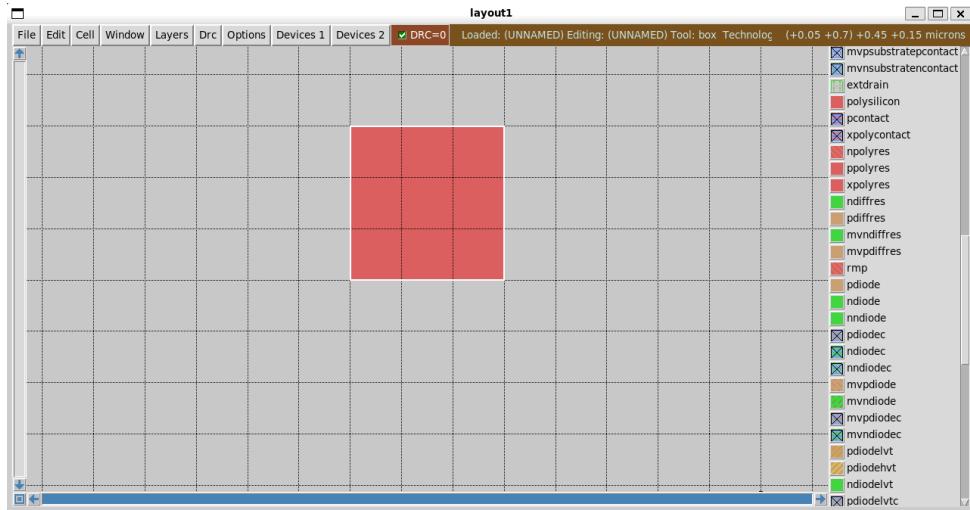


Figura 16: Resultado final: a área selecionada agora está preenchida com a camada de polisilício.

Remoção de Camadas (Comando Erase) Além de desenhar camadas, o Magic permite também a remoção de regiões específicas do layout. Essa operação é realizada com o comando `erase`, que apaga a camada especificada dentro da área selecionada.

Passo 1: Utilizar a janela de console Assim como o comando `paint`, o `erase` é executado por meio da janela de console do Magic. É nela que os comandos são digitados, como ilustrado na Figura 17.

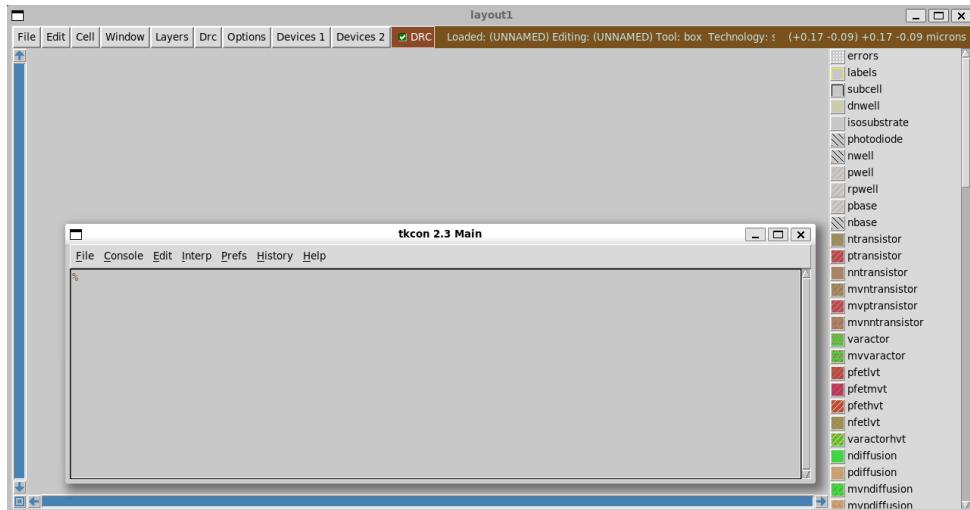


Figura 17: A janela de console do Magic, onde os comandos de texto são inseridos.

Passo 2: Selecionar a área a ser apagada Antes de apagar uma camada, é necessário selecionar a área correspondente no layout. Use o mouse para desenhar uma caixa sobre a região que será afetada pelo comando (Figura 18).

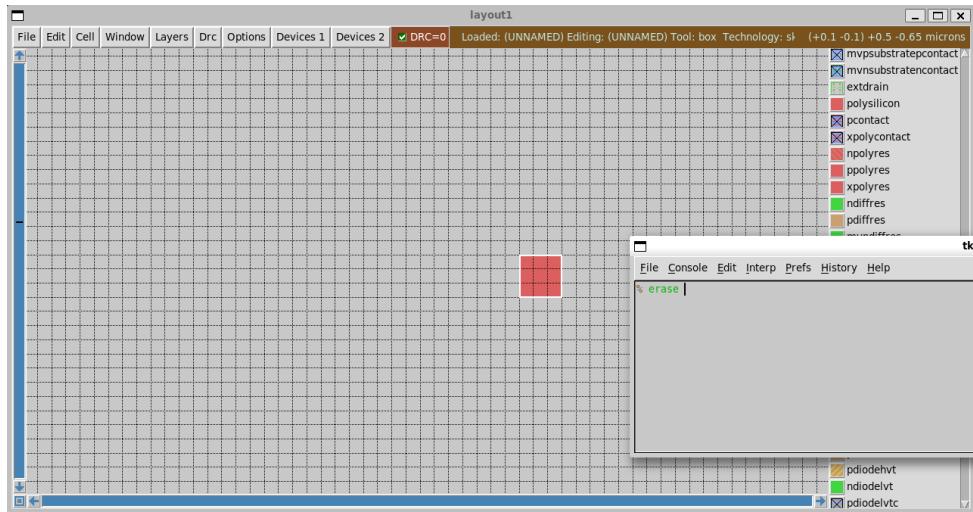


Figura 18: Selecionando a área onde a camada será removida.

Passo 3: Digitar o comando de remoção Com a área definida, digite no console o comando `erase <nome_da_camada>`. Por exemplo, para remover uma região com a camada `poly`, digite `erase poly`, conforme a Figura 19.

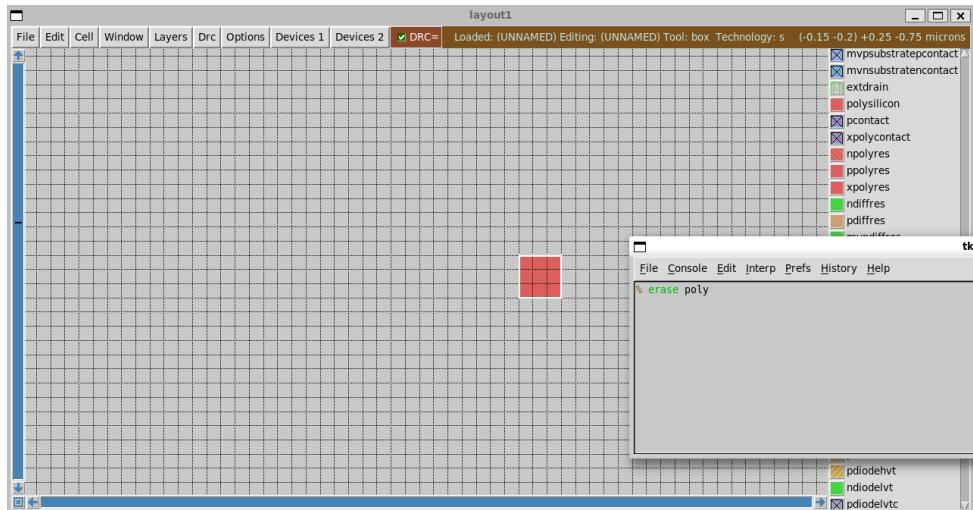


Figura 19: Digitando o comando 'erase poly' no console para apagar a camada.

Passo 4: Verificar o resultado Após executar o comando, a camada selecionada será removida da área especificada. A alteração é refletida imediatamente na janela de layout, como ilustrado na Figura 20.

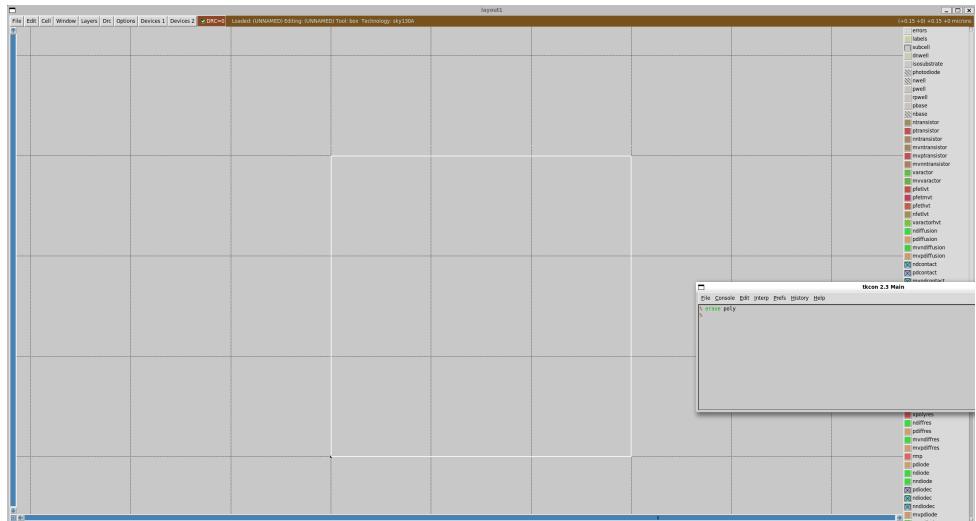


Figura 20: Resultado final: a região onde havia poly foi apagada com sucesso.

Navegação na Hierarquia do Projeto Projetos de layout são quase sempre hierárquicos, compostos por células que contêm outras células (instâncias). O Magic fornece comandos para navegar por essa estrutura, permitindo editar sub-células entre a hierarquia de forma isolada.

Passo 1: Selecionar a instância Para inspecionar ou editar uma sub-célula (como um transistor), o primeiro passo é selecioná-la. Posicione o cursor do mouse sobre a instância desejada e pressione a tecla **i**. A instância ficará destacada, como mostra a Figura 21.

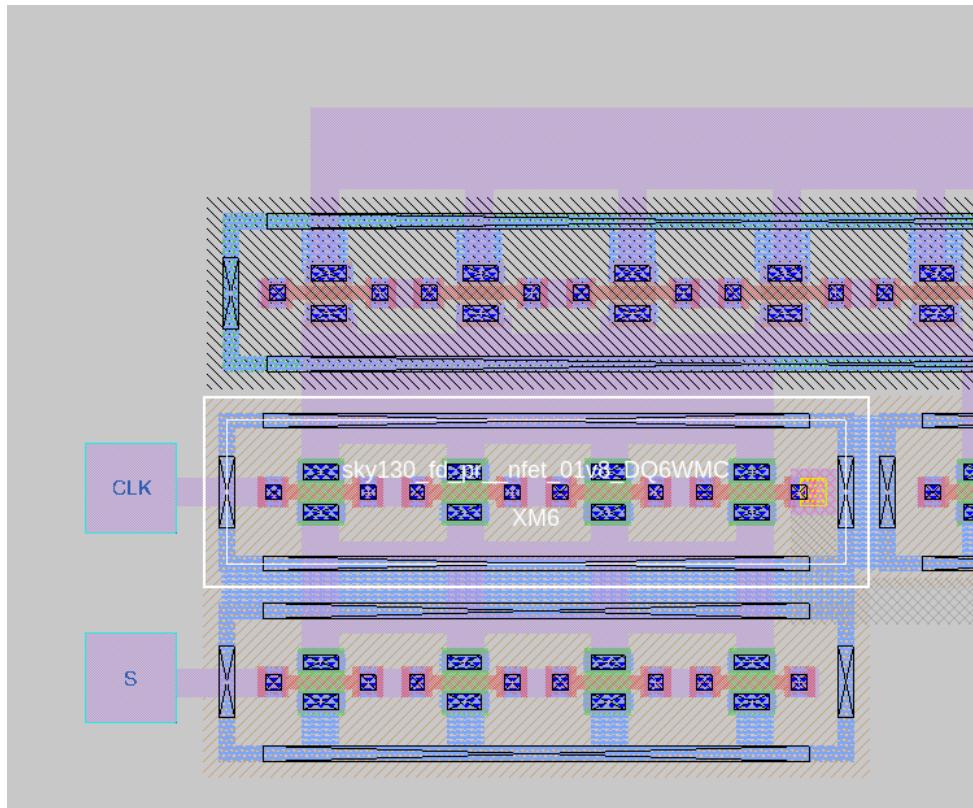


Figura 21: Selecionando uma instância de transistor (n-fet) com a tecla 'i'.

Passo 2: Descer na hierarquia Com a instância selecionada, pressione a tecla > (sinal de "maior que") para "descer" um nível e abrir a definição daquela célula para edição. A janela de layout agora mostrará o conteúdo interno do transistor, como ilustrado na Figura 22. Para retornar ao nível superior, utiliza-se a tecla < (sinal de "menor que").

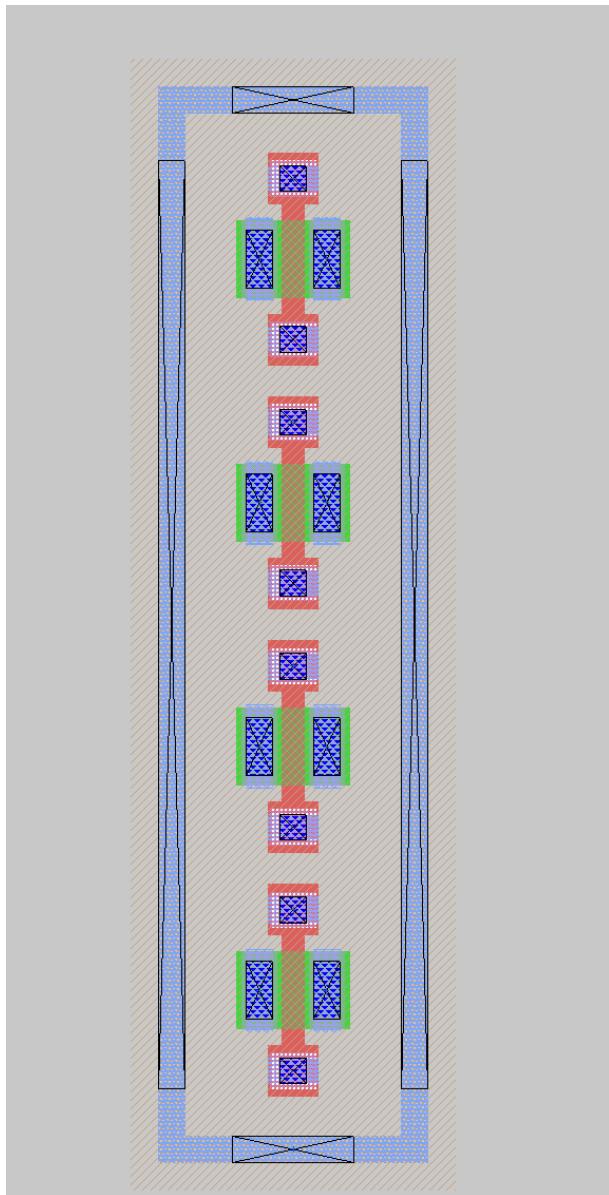


Figura 22: Utilizando a tecla '>' para descer na hierarquia e editar a célula selecionada.

2.2 Edição e Manipulação de Objetos

Esta seção cobre os comandos fundamentais para criar e modificar a geometria do layout.

2.2.1 Seleção de Elementos

O primeiro passo para editar qualquer objeto é selecioná-lo. O Magic oferece diferentes formas de seleção, cada uma adequada para uma tarefa específica.

Seleção por Conectividade (Tecla 's') Uma das formas mais poderosas de seleção é por conectividade, utilizando a tecla de atalho **s**. Ao posicionar o cursor sobre uma geometria (como um fio de metal) e pressionar **s**, o Magic seleciona todo o material do mesmo tipo que está eletricamente conectado.

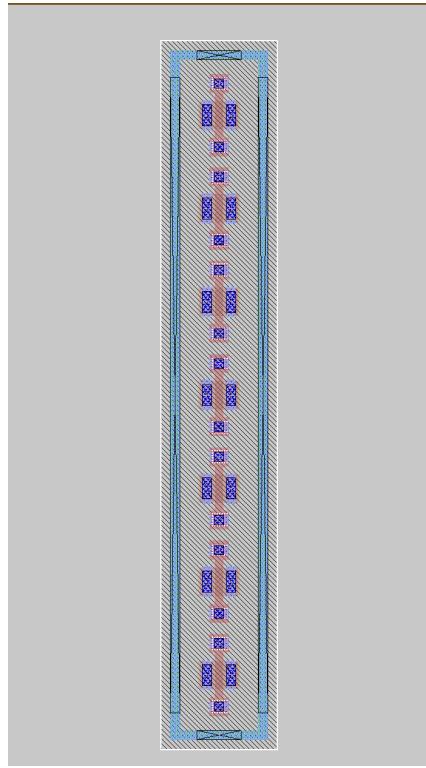


Figura 23: Selecionando toda uma trilha de metal conectada com a tecla 's'.

Seleção por Caixa (Comando 'box') Para selecionar todos os elementos dentro de uma área retangular, utiliza-se o comando `box`. Após digitar o comando no console, o cursor mudará de forma, permitindo que você clique em dois cantos opostos para definir a caixa de seleção.

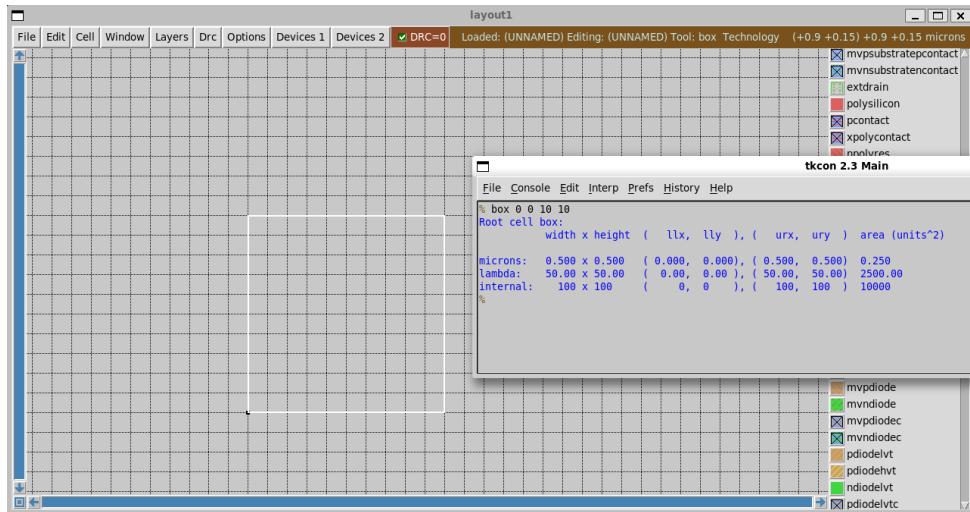


Figura 24: Utilizando o comando 'box' para definir uma área de seleção.

Seleção de Célula (Tecla 'i') Em projetos hierárquicos, para selecionar uma instância de célula inteira (como um inversor ou um transistor) em vez de suas partes, o comando correto é a tecla de atalho `i`. Posicione o cursor sobre a instância e pressione `i` para selecioná-la como um único objeto.

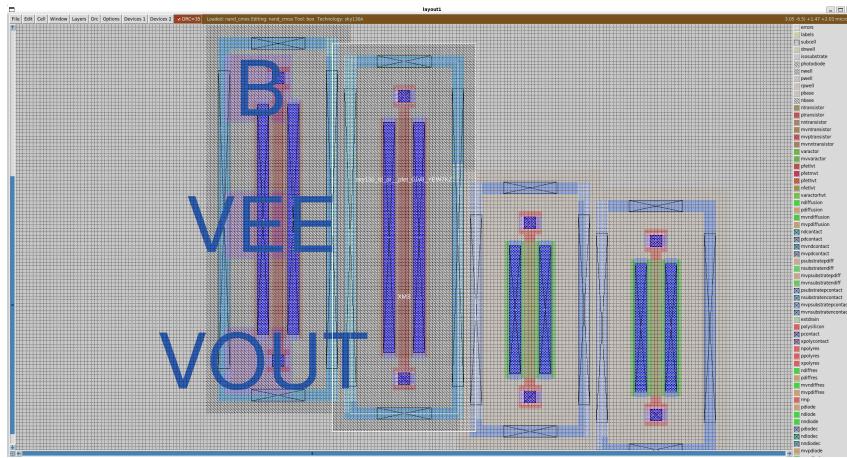


Figura 25: Pressionando a tecla 'i' para selecionar uma instância de célula inteira.

2.2.2 A Caixa (Box) e o Cursor: Ferramenta Fundamental de Edição

Dois elementos, a **caixa (box)** e o **cursor**, são usados para selecionar objetos na Janela Gráfica. Conforme o mouse se move, o cursor o acompanha, e a sua forma indica qual das quatro ferramentas está ativa no momento. Pressionar a **barra de espaço** alterna entre as 4 ferramentas disponíveis:

- **Box Tool (Ferramenta de Caixa):** É a ferramenta padrão, indicada por um cursor em forma de cruz (*crosshair*). É usada para posicionar a caixa, além de pintar e apagar camadas.
- **Wiring Tool (Ferramenta de Roteamento):** Utilizada para criar conexões e fios de forma avançada.
- **Netlist Tool (Ferramenta de Netlist):** Para análise de conectividade e comparação com o esquemático.
- **Rsim Tool (Ferramenta Rsim):** Para interação com o simulador Rsim.

O propósito da Box Tool é especificar uma área retangular do layout para edição.

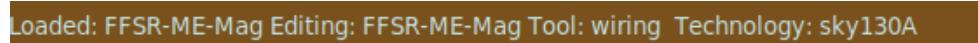
Escolhendo o modo Box ou Wiring: Além de pintar áreas estáticas, o Magic oferece uma poderosa Wiring Tool para criar conexões. Este processo é mais dinâmico que o simples uso da Box Tool e segue um fluxo intuitivo, demonstrado nos cinco passos a seguir.

Passo 1: Ativar a Ferramenta de Seleção O processo geralmente começa com a Box Tool padrão, indicada pelo cursor em forma de cruz, pronta para qualquer ação inicial.



Figura 26: O modo de seleção Box Tool está ativo.

Passo 2: Alternar para o Modo de Roteamento Pressionando a **barra de espaço**, o modo é alterado para a **Wiring Tool**. Note que o cursor muda de forma para indicar que a ferramenta de roteamento está pronta para uso.



Loaded: FFSR-ME-Mag Editing: FFSR-ME-Mag Tool: wiring Technology: sky130A

Figura 27: Com a barra de espaço, o modo é trocado para **Wiring Tool**.

Passo 3: Selecionar o Ponto de Partida Com a **Wiring Tool** ativa, clique com o botão esquerdo do mouse sobre o ponto de origem da conexão, como um pino ou uma área de metal já existente.



Figura 28: O pino de origem da conexão é selecionado com um clique.

Passo 4: Arrastar para Visualizar o Caminho Mantenha o botão do mouse pressionado e arraste o cursor em direção ao destino. O Magic exibirá dinamicamente uma pré-visualização do caminho que o fio irá percorrer.

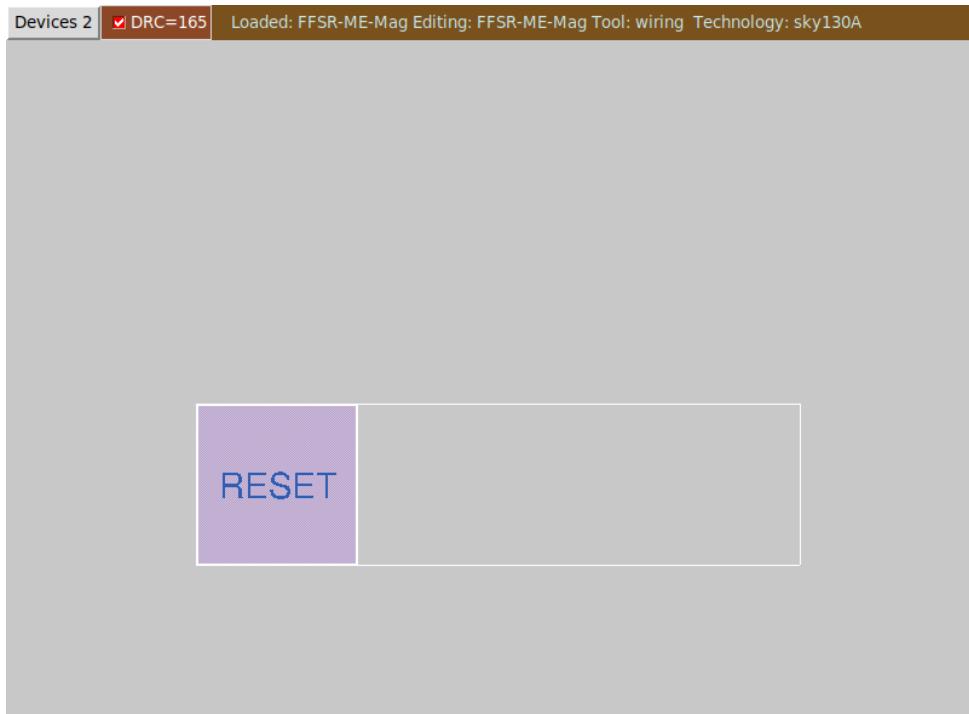


Figura 29: Ao arrastar o mouse, a ferramenta mostra uma pré-visualização do roteamento.

Passo 5: Concluir e Pintar a Conexão Ao soltar o botão do mouse no ponto de destino desejado, a conexão é confirmada. O Magic então "pinta" a trilha de metal permanentemente no layout, finalizando o roteamento.

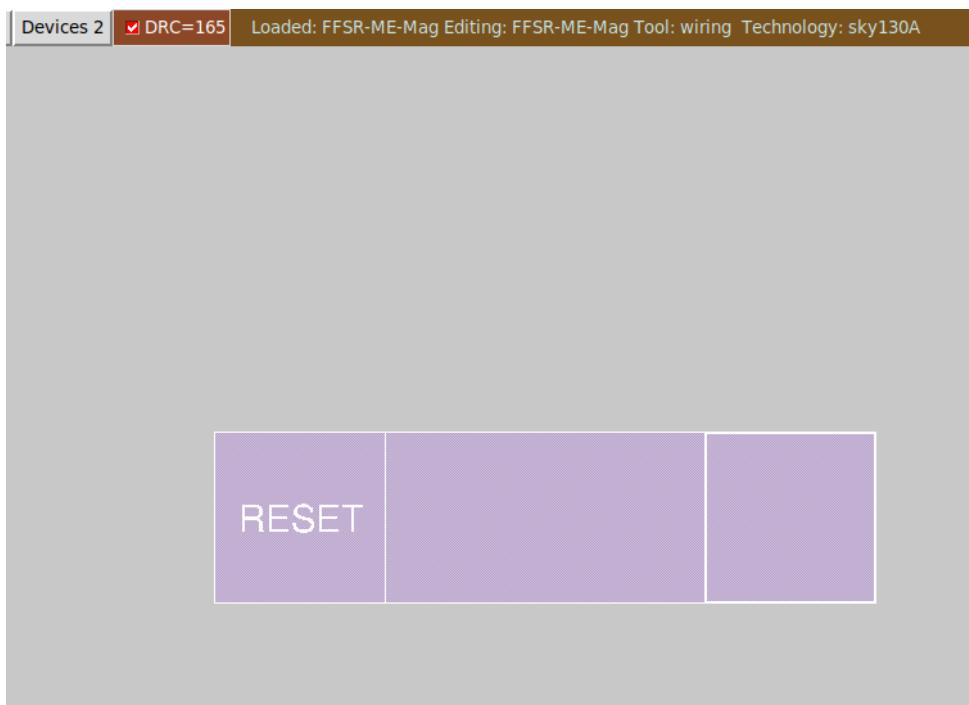


Figura 30: Ao soltar o clique, o caminho pré-visualizado é pintado, criando a trilha final.

2.2.3 Comandos de Modificação

Após selecionar um ou mais objetos, podemos aplicar diversas transformações.

Mover O comando **move** (ou a tecla de atalho **m**) permite reposicionar os elementos selecionados. O movimento pode ser livre ou alinhado à grade, dependendo da configuração do "snap to grid". É importante que a célula ou camada esteja previamente selecionada, seja via **i** ou **s**.

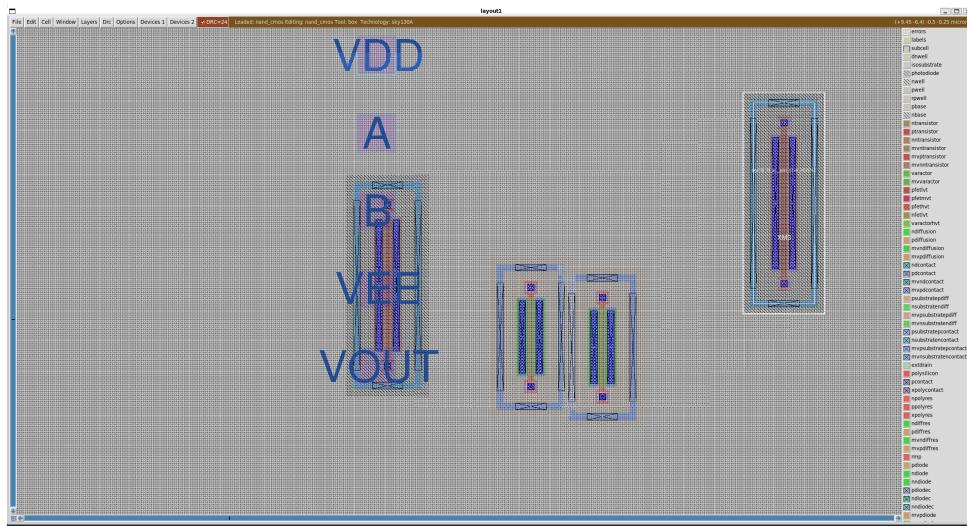


Figura 31: Movendo um componente **selecionado** para uma nova posição.

Rotacionar Para girar um objeto, utilize o atalho **r**. Geralmente, as rotações são feitas em incrementos de 90 graus, o que é ideal para a maioria das aplicações em layout.

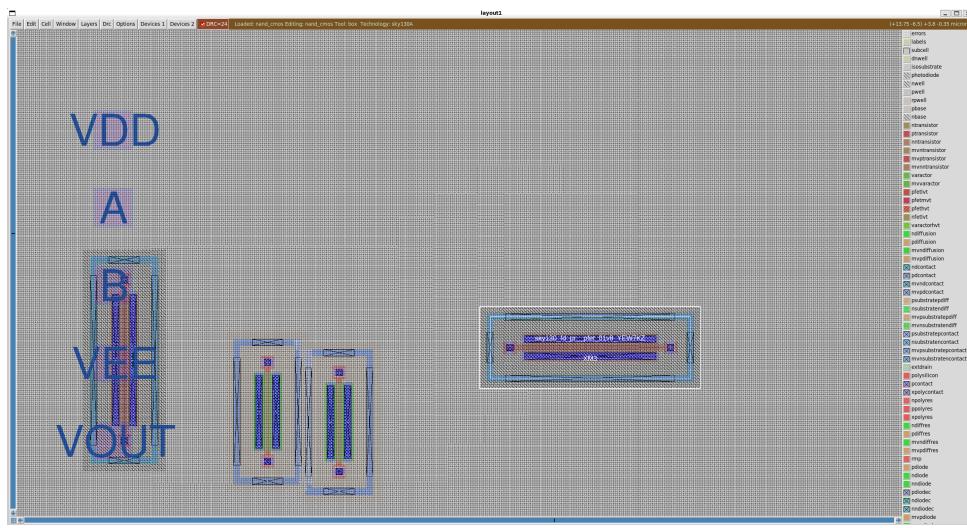


Figura 32: Rotacionando um objeto em 90 graus.

Apagar Para apagar uma célula (*cell*) ou um dispositivo (*device*) no layout, selecione a área correspondente e pressione a tecla **d**.

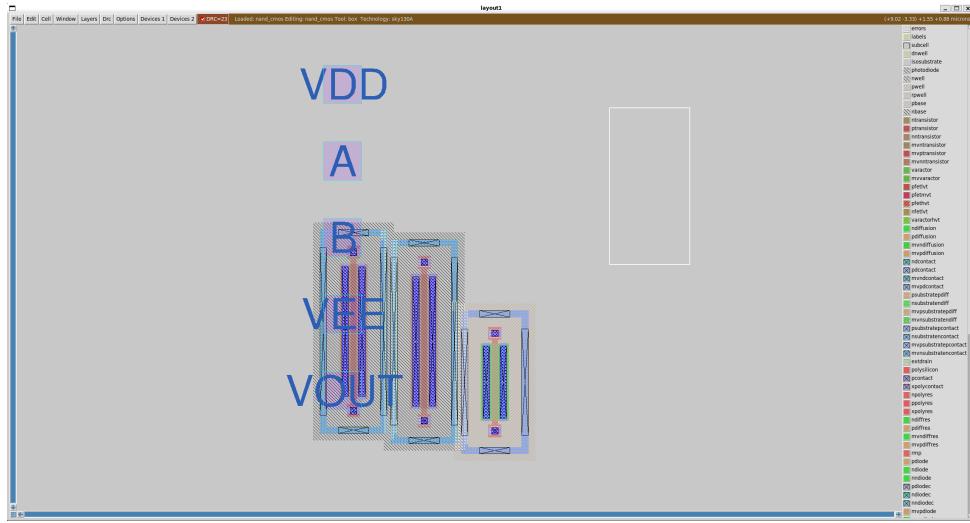


Figura 33: Apagando uma célula ou dispositivo com o atalho d.

2.2.4 Controle de Visibilidade e Histórico

Ocultar Camadas Para simplificar a visualização, especialmente em layouts gigantes, é possível ocultar camadas específicas de forma interativa através da paleta de camadas.

Passo 1: Identificar a camada no layout Primeiramente, observe o layout com todas as camadas visíveis. Na Figura 34, a camada de polisilício, que desejamos ocultar, está visível e selecionada.

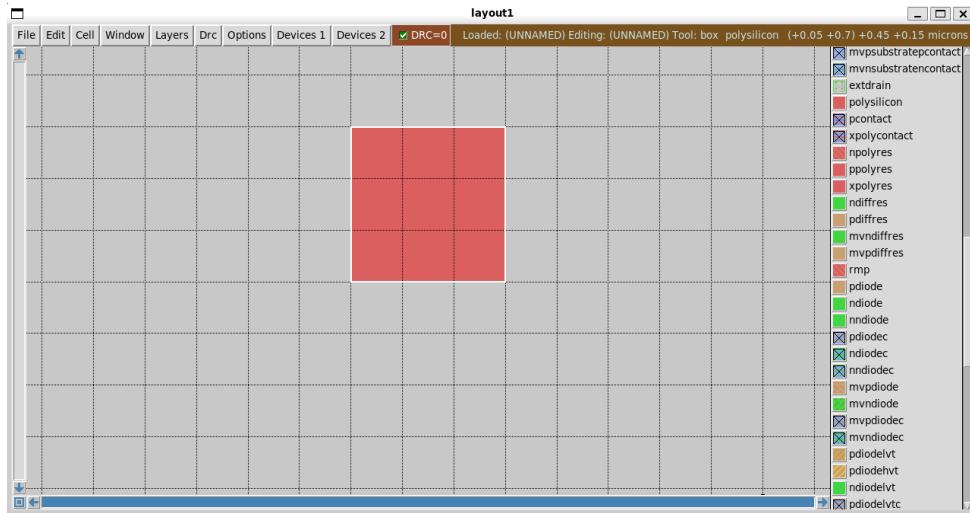


Figura 34: Visualização inicial com a camada de polisilício presente no layout.

Passo 2: Ação na paleta de camadas Para ocultar a camada, localize seu nome na paleta de camadas. Clique com o botão direito do mouse sobre a caixa correspondente (neste caso, "polysilicon") para fazê-la desaparecer, como indicado na Figura 35. Para exibi-la novamente, basta clicar com o botão esquerdo no mesmo local.



Figura 35: Clicando com o botão direito na camada 'polysilicon' na paleta para ocultá-la.

Passo 3: Visualizar o resultado Imediatamente após o clique, a camada some da janela de layout, permitindo focar em outras partes do circuito. A Figura 36 mostra o resultado final, com a geometria de polisilício agora oculta.

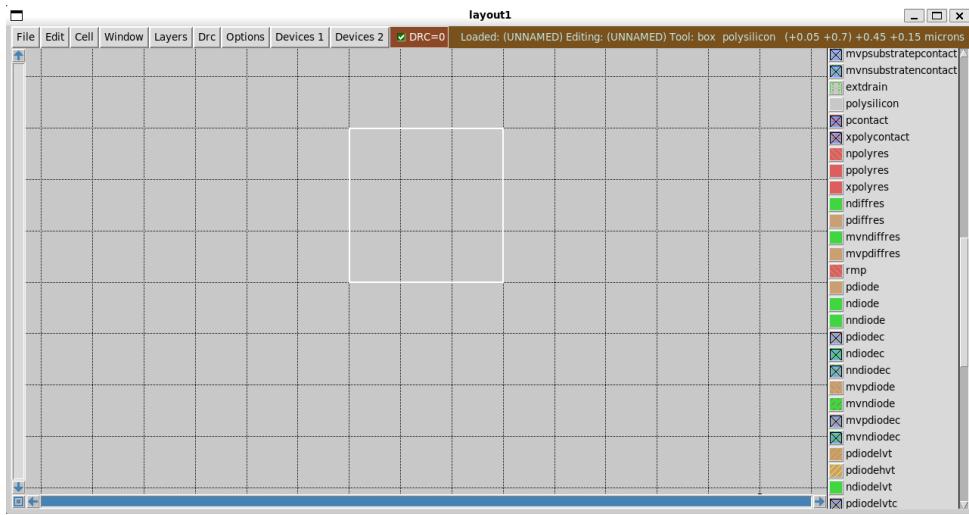


Figura 36: Resultado final: a camada de polisilício não está mais visível no layout.

Desfazer e Refazer O Magic mantém um histórico de suas ações, permitindo corrigir erros rapidamente ou navegar entre diferentes versões de uma edição.

Desfazer (Undo) O comando para reverter a última operação é `undo`, ou mais simplesmente, a tecla de atalho `u`. Por exemplo, se um transistor foi apagado por engano, pressionar `u` o restaurará imediatamente, como pode ser visto na Figura 37.

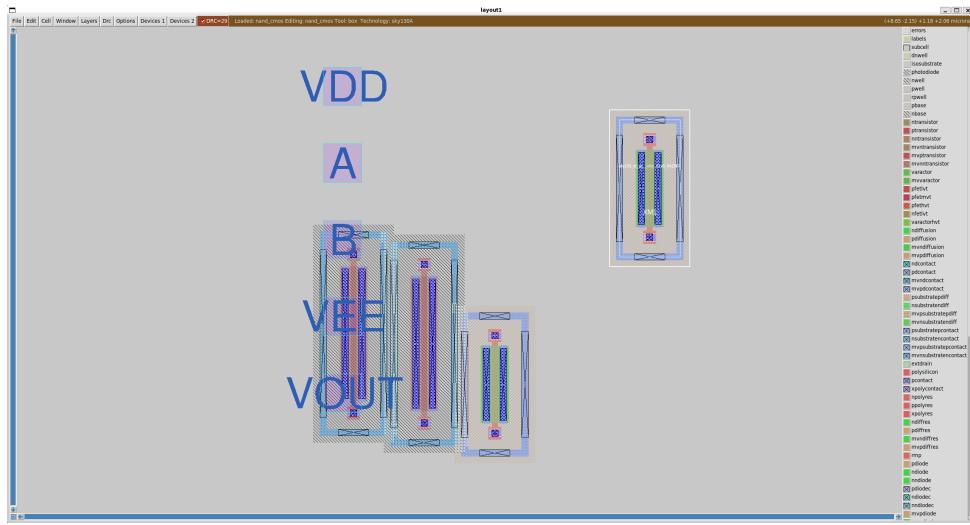


Figura 37: Pressionando 'u' para desfazer a exclusão acidental de um transistor.

Refazer (Redo) Se você mudar de ideia e quiser reaplicar a ação que acabou de ser desfeita (neste caso, apagar o transistor novamente), utilize a combinação de teclas **Shift** + **u**. O comando **redo** também pode ser usado. A Figura 38 ilustra o estado do layout após refazer a exclusão.

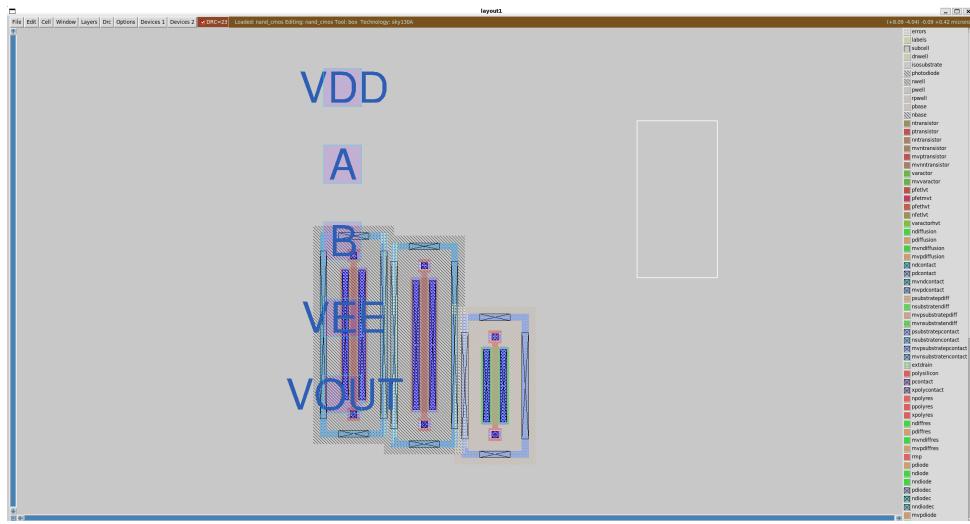


Figura 38: Pressionando 'Shift + u' para refazer a ação.

3 Resumo de Atalhos

A Tabela 1 resume os principais atalhos de teclado utilizados na ferramenta Magic, facilitando a navegação, edição e controle hierárquico do layout. Um ponto importante: **tome cuidado com o Caps Lock habilitado**, pois ele pode alterar o comportamento esperado dos atalhos.

Tabela 1: Principais atalhos de teclado no Magic.

Atalho	Função
z	Aproxima a visualização (Zoom In)
Shift + z	Afasta a visualização (Zoom Out)
Ctrl + z	Centraliza a visualização na seleção
u	Desfaz a última ação
Shift + u	Refaz a ação desfeita
d	Apaga o objeto selecionado
m	Move o objeto selecionado
r	Rotaciona o objeto selecionado
g	Altera visibilidade da grade
x	Exibe o dispositivo importado selecionado
Shift + x	Oculta o dispositivo importado selecionado
>	Desce para subnível da célula (entra na hierarquia)
<	Sobe para o nível superior (sai da subcélula)
s	Seleciona nós e visualiza conexões elétricas
i	Seleciona uma célula inteira (instância)
Setas do teclado	Move a visualização (navegação pela área de layout)

Tabela 2: Funções dos botões do mouse no Magic.

Botão	Área Geral	Área de Paint
Esquerdo	Exibe camada/dispositivo	Seleciona um ponto da caixa
Direito	Oculta camada/dispositivo	Seleciona o outro ponto da caixa
Meio	Pinta camada/dispositivo	Seleciona área para pintura

4 Camadas e Construção do Layout Físico

A construção do layout físico consiste em desenhar as geometrias que representarão os componentes do circuito (transistores, fios, etc.) em diferentes camadas de materiais. A organização vertical desses materiais, mostrada na Figura 39, é chamada de *metal stack* e serve como um guia fundamental para entender como as conexões devem ser feitas.

(Diagram not to scale!)

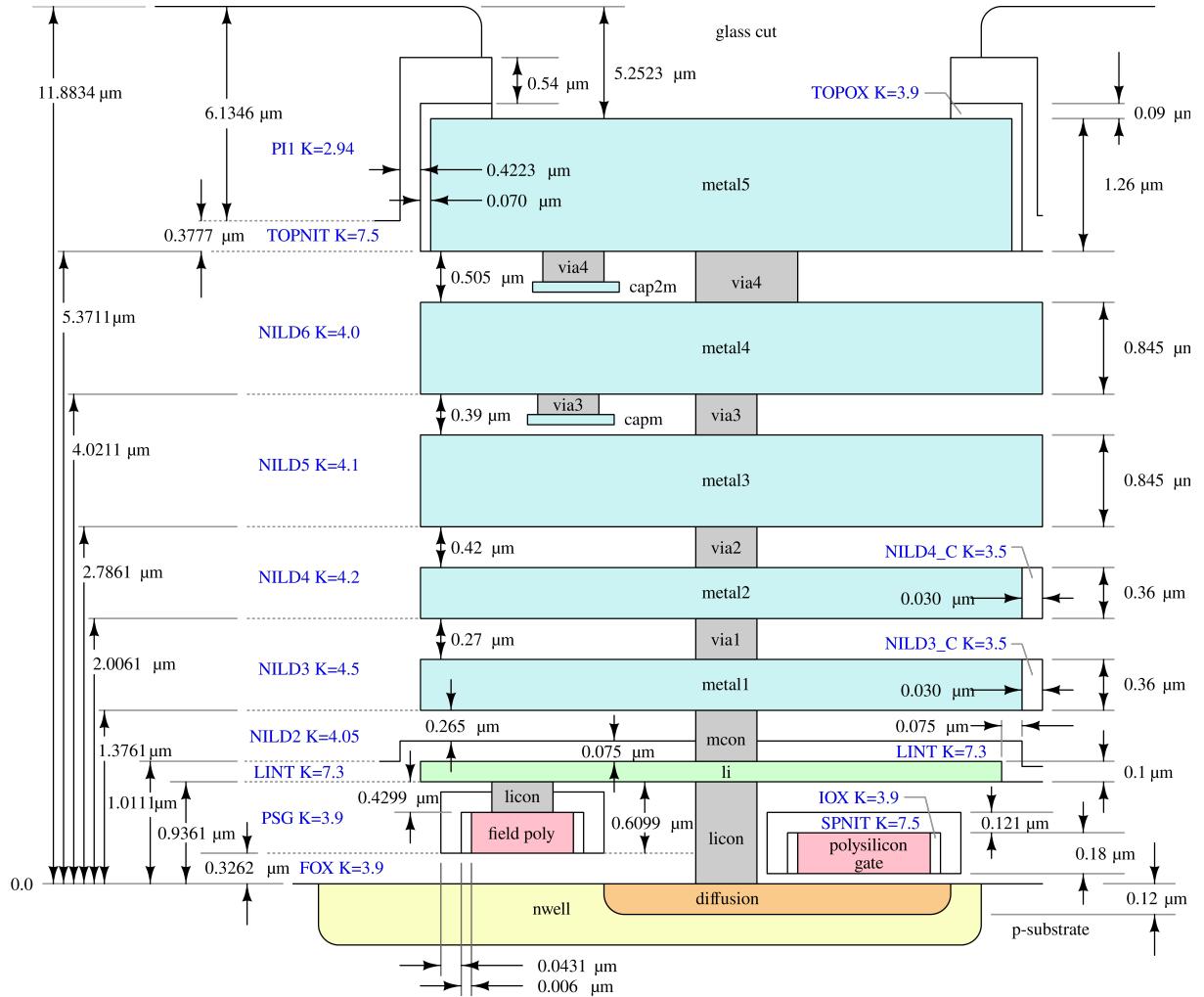


Figura 39: Exemplo de um *metal stack* de um processo CMOS, mostrando as diferentes camadas de metal (metal1 a metal5), polisilício e contatos/vias.

4.0.1 Camadas de Layout

O processo de desenho começa com a definição das camadas mais baixas, que formam os dispositivos semicondutores:

- **Áreas de Difusão (diffusion):** Formam a fonte e o dreno dos transistores.
- **Polisilício (polysilicon):** Forma a porta (gate) dos transistores.

A sobreposição de polisilício sobre a difusão define o canal do transistor.

4.0.2 Interconexões: Metais, Contatos e Vias

Com os transistores definidos, o próximo passo é conectar-los para formar o circuito. Essas conexões, ou roteamento, são feitas com as camadas de metal. Como a Figura 39 ilustra, cada camada de metal é separada por um material isolante, o que impede o contato direto.

Para criar uma conexão vertical através desses isolantes, são utilizadas duas estruturas de conexão fundamentais:

- **Contatos:** Conectam a primeira camada de metal (`metal1`) às camadas de base do transistor (difusão e polisilício). No diagrama de exemplo, este tipo de contato é o `licon`.
- **Vias:** Conectam uma camada de metal a outra (ex: `via1` conecta `metal1` a `metal2`). Cada transição entre diferentes níveis de metal exige um tipo de via específico.

5 Introdução à Criação de *Layout*

Toda a construção de *layouts* utilizando o PDK-130 deve seguir o mapa de camadas fornecido pela documentação disponível em <https://skywater-pdk.readthedocs.io/en/main/>. A seguir, apresenta-se um exemplo de construção de um transistor do tipo *p*. As figuras abaixo ilustram o processo, utilizando a ferramenta de seleção (*box*) e a ferramenta de pintura (*paint*) para adição das camadas, conforme apropriado.

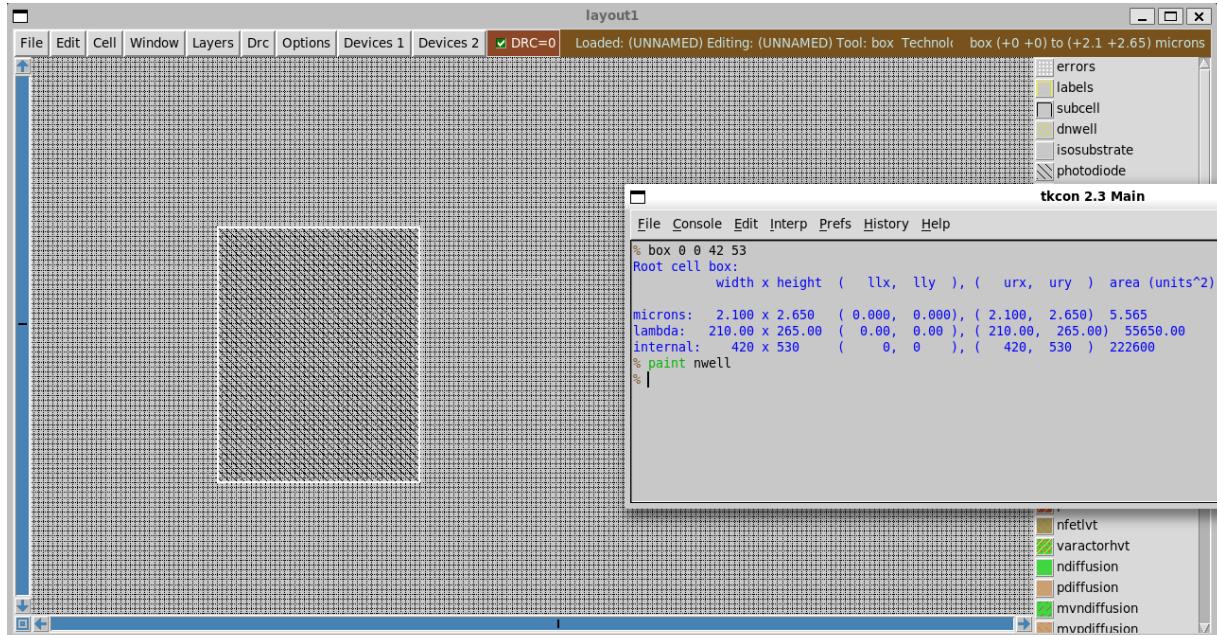


Figura 40: Preparando o substrato tipo-*n* (`nwell`).

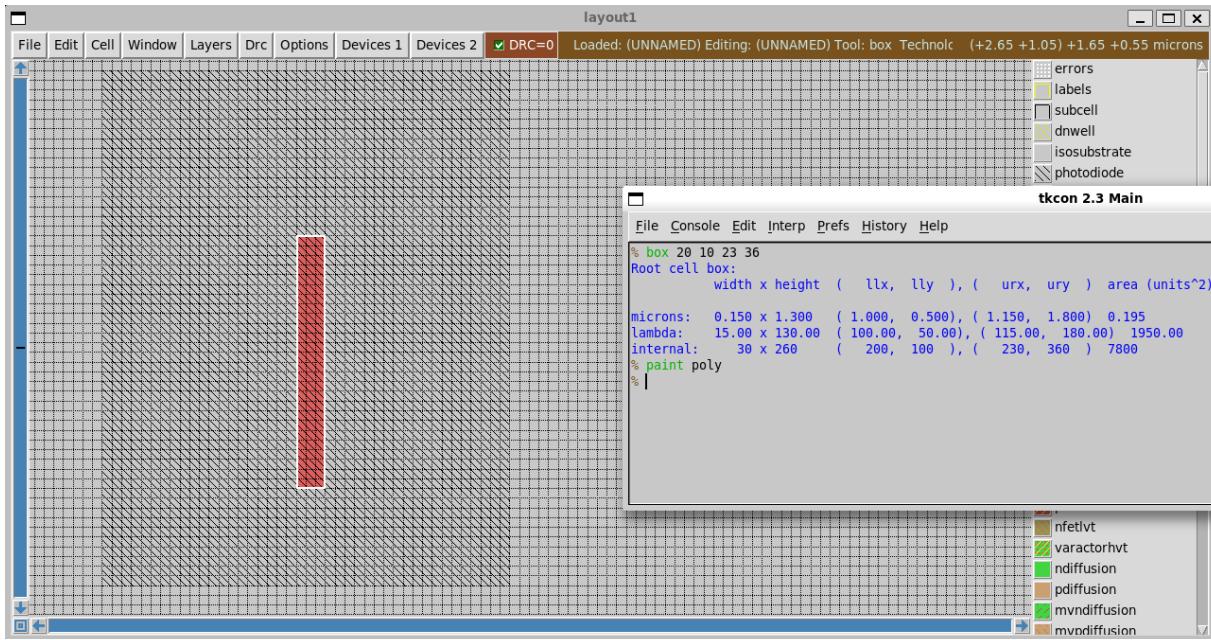


Figura 41: Adicionando o polissilício com largura de 150 nm (poly).

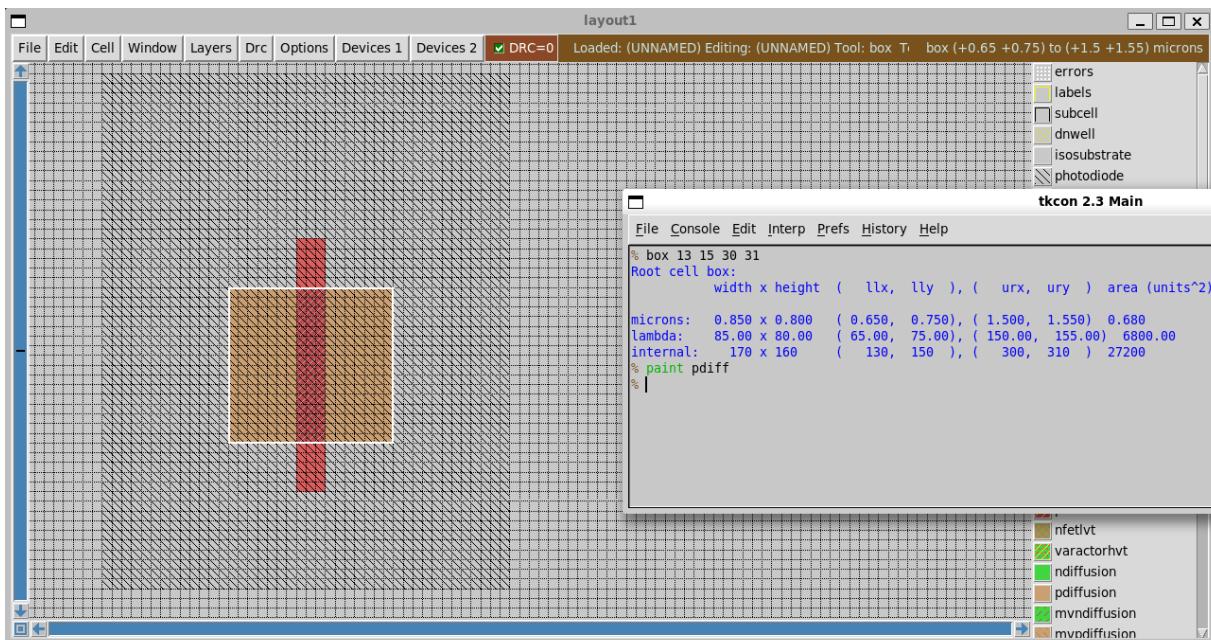


Figura 42: Adicionando a difusão do tipo-p (pdiff).

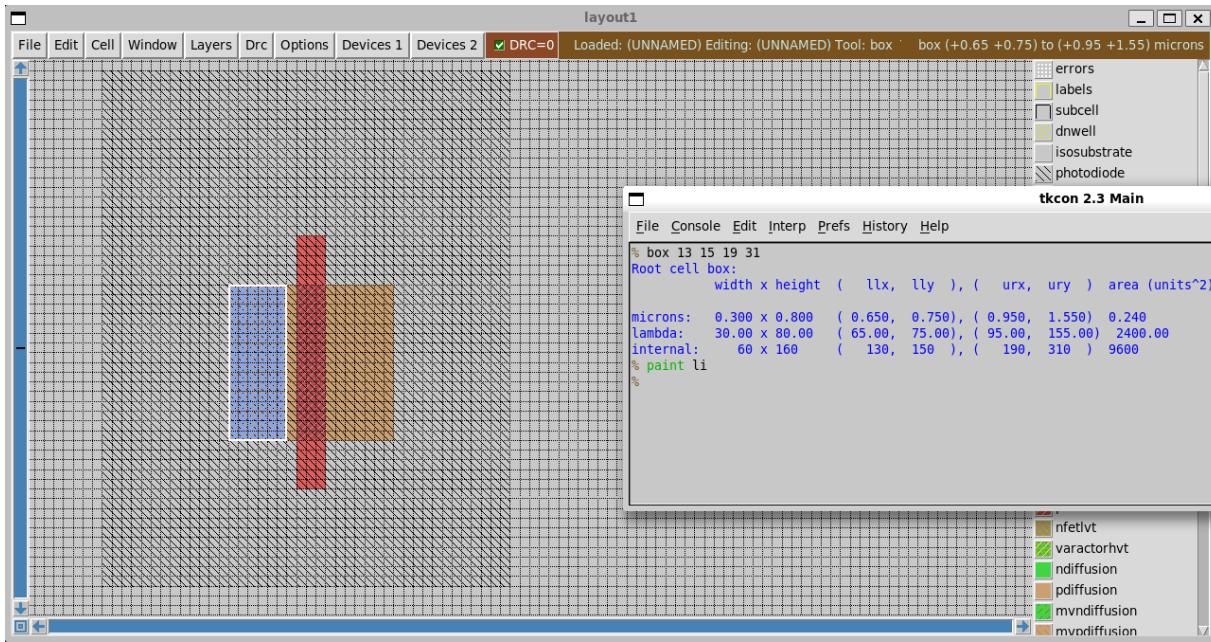


Figura 43: Adicionando camada de interconexão local (li).

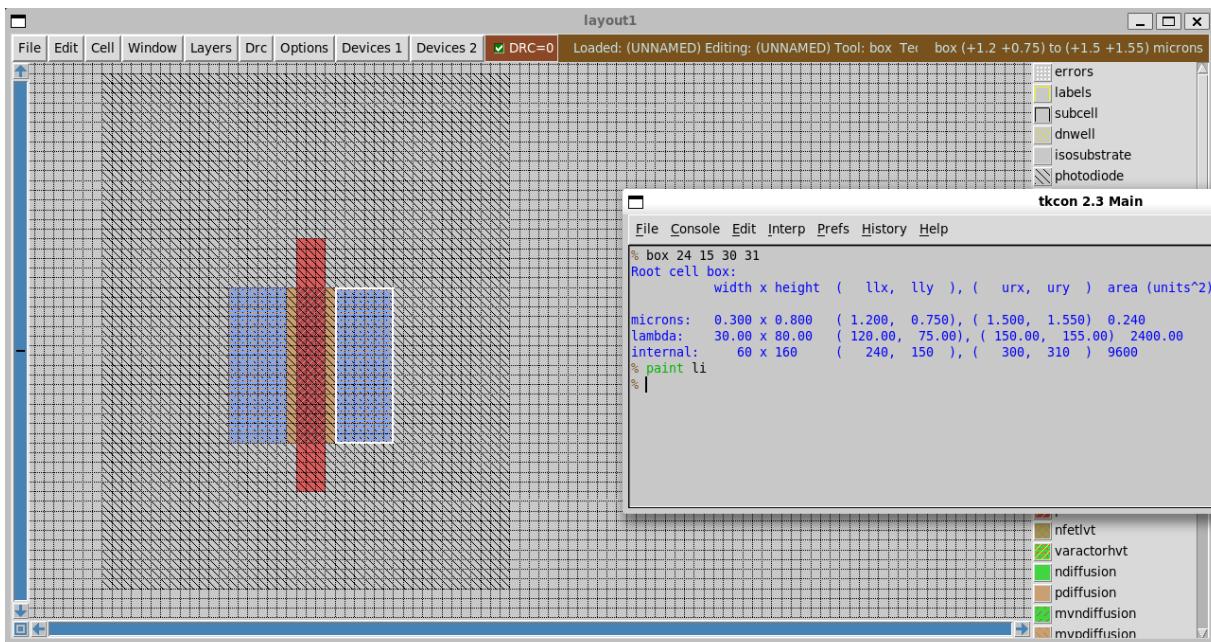


Figura 44: Continuação da adição da camada li.

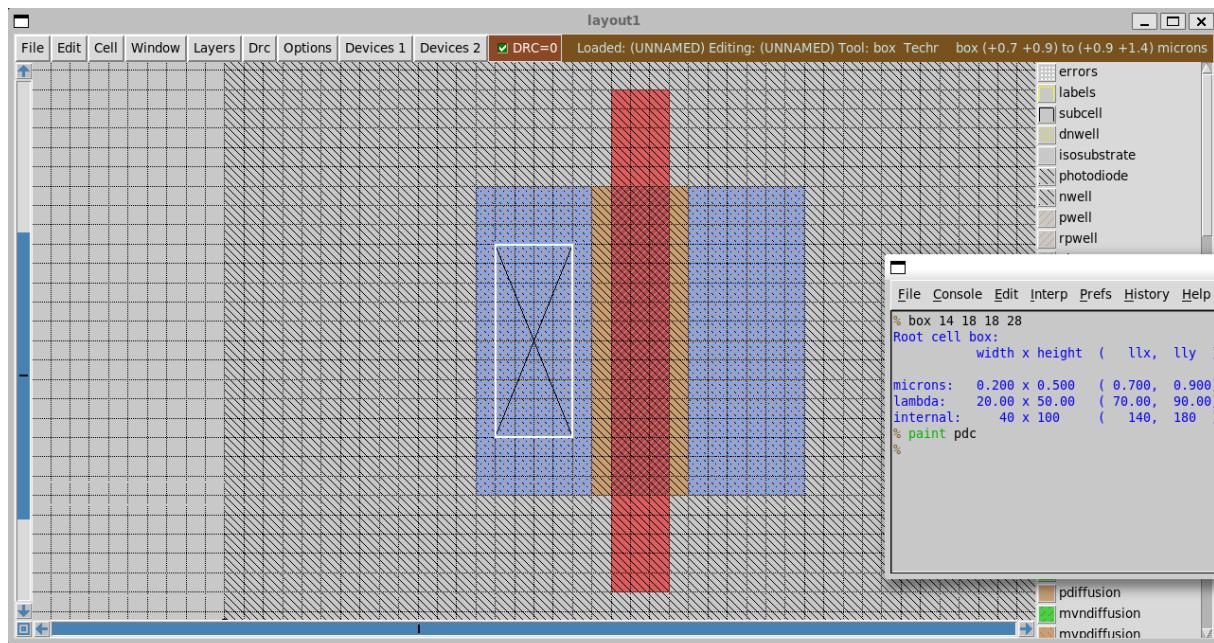


Figura 45: Adicionando a camada de contato pdc sobre li.

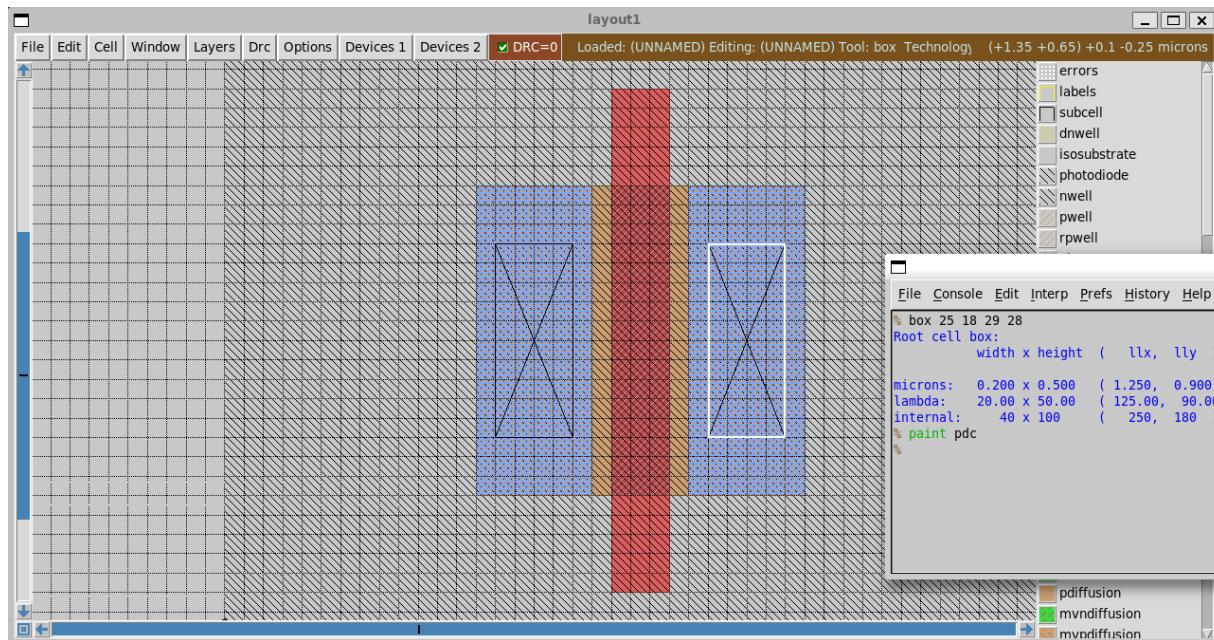


Figura 46: Continuação da adição da camada pdc.

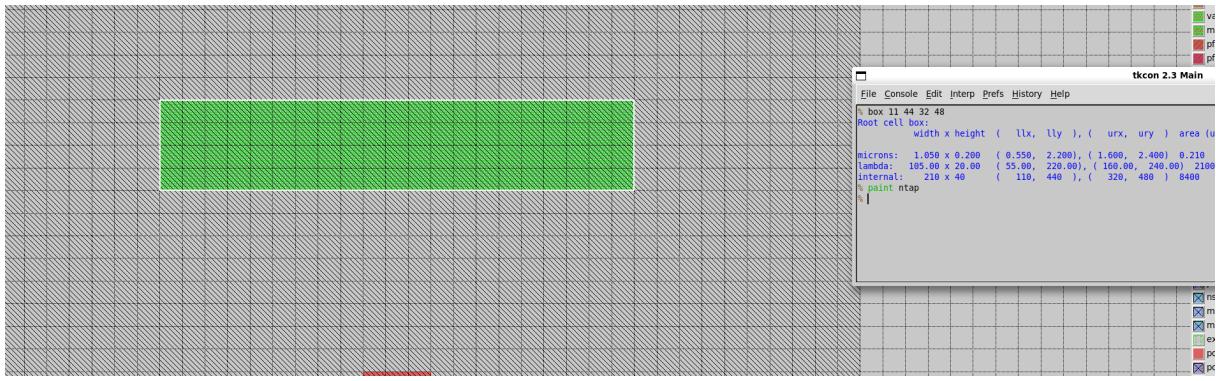


Figura 47: Adicionando ntap para polarização do substrato.

A área destacada na Figura 47 será utilizada para polarizar o substrato, desde que seja possível conectá-la adequadamente. Para isso, as próximas etapas adicionam as camadas ntapc (contato para ntap), li, m1 (metal 1) e mcon (contato para metal 1).

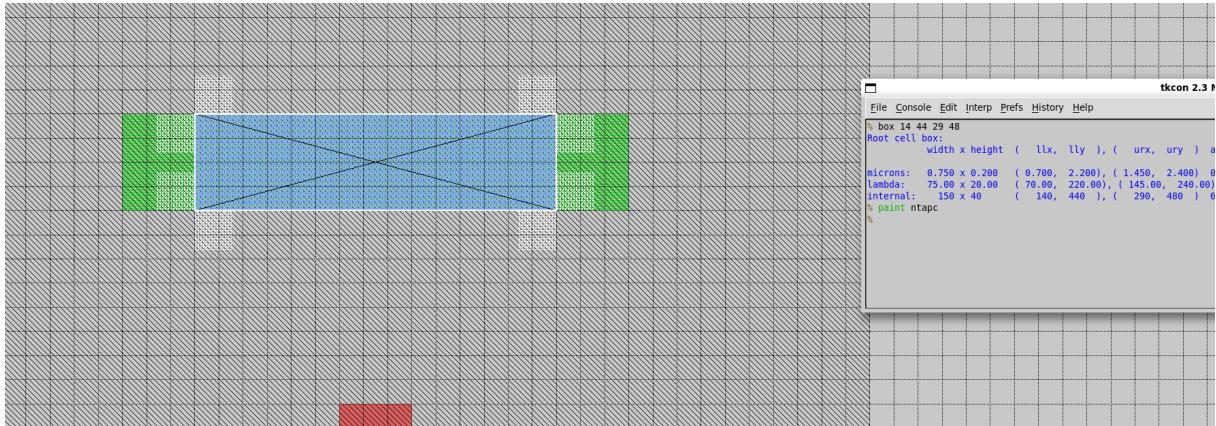


Figura 48: Adicionando ntapc sobre o ntap para permitir contato elétrico.

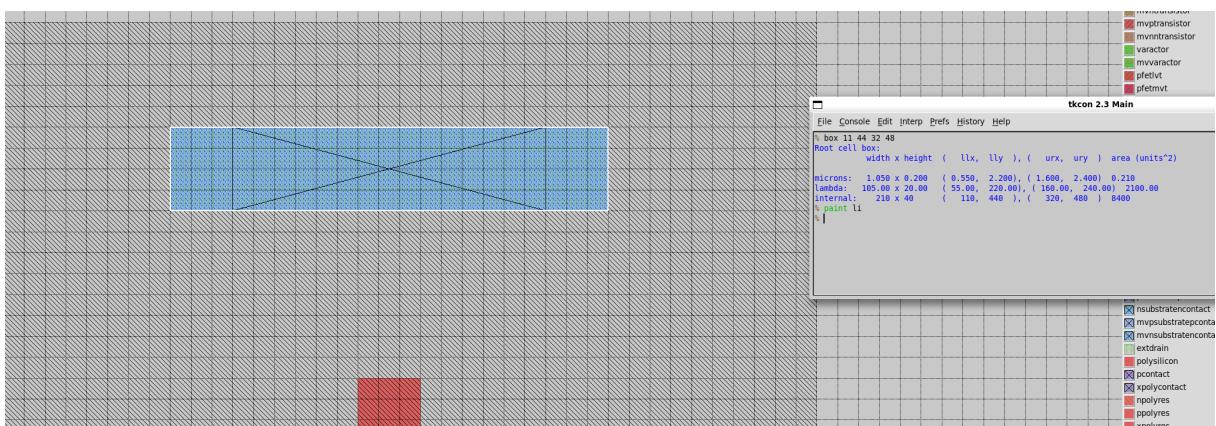


Figura 49: Adicionando li para correção de erros de DRC.

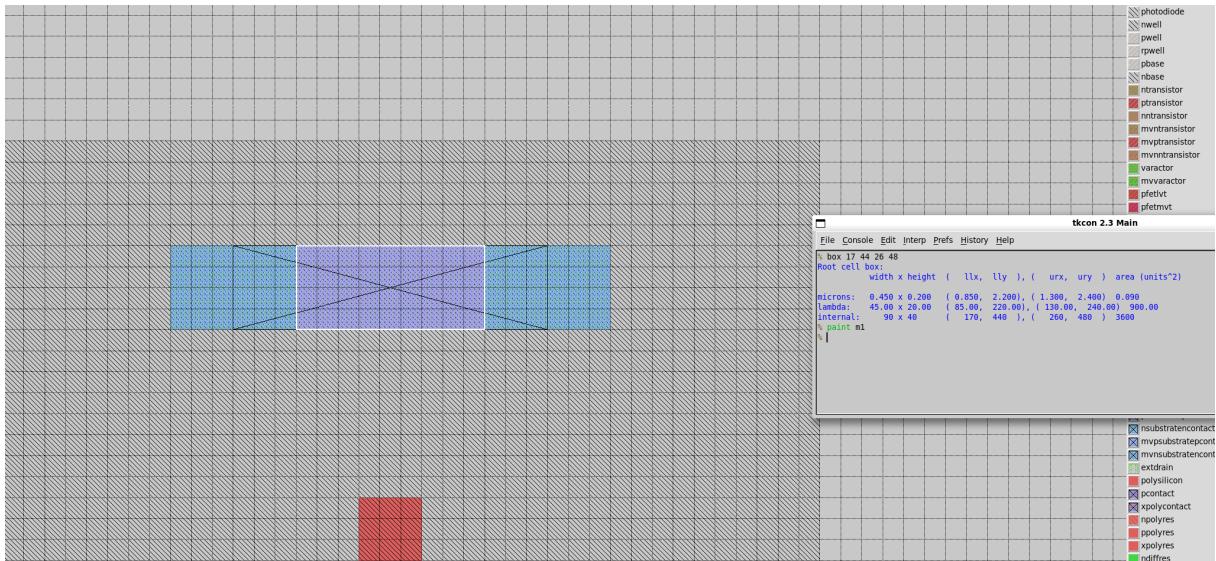


Figura 50: Adicionando camada m1 (metal 1).

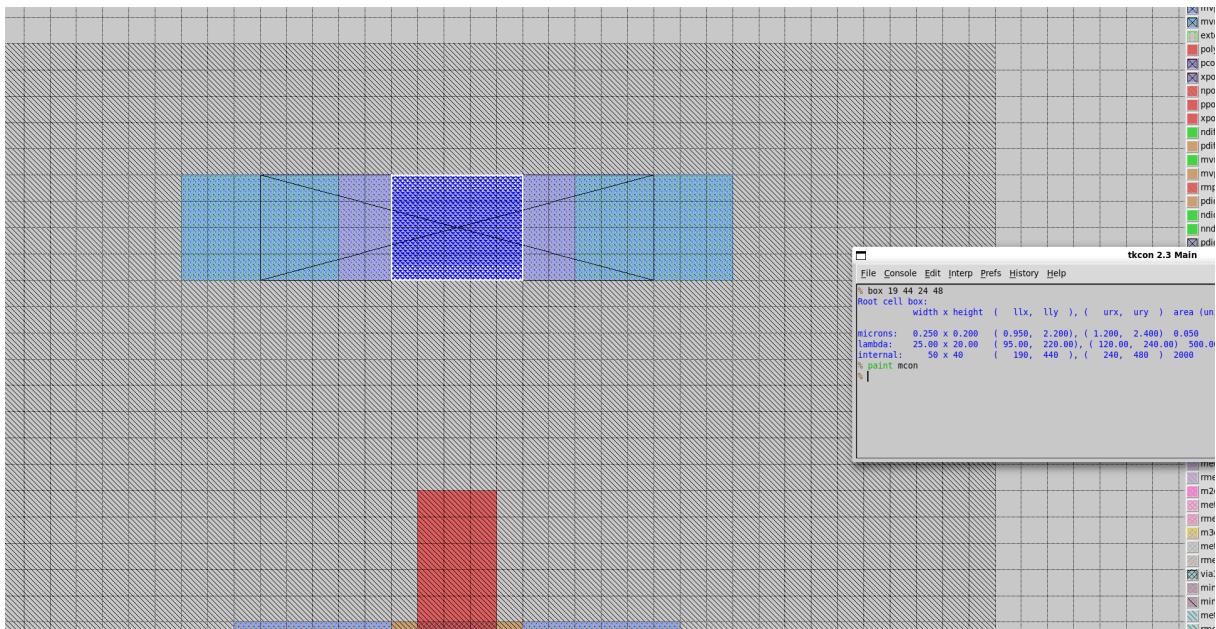


Figura 51: Adicionando contato para m1 (mcon).

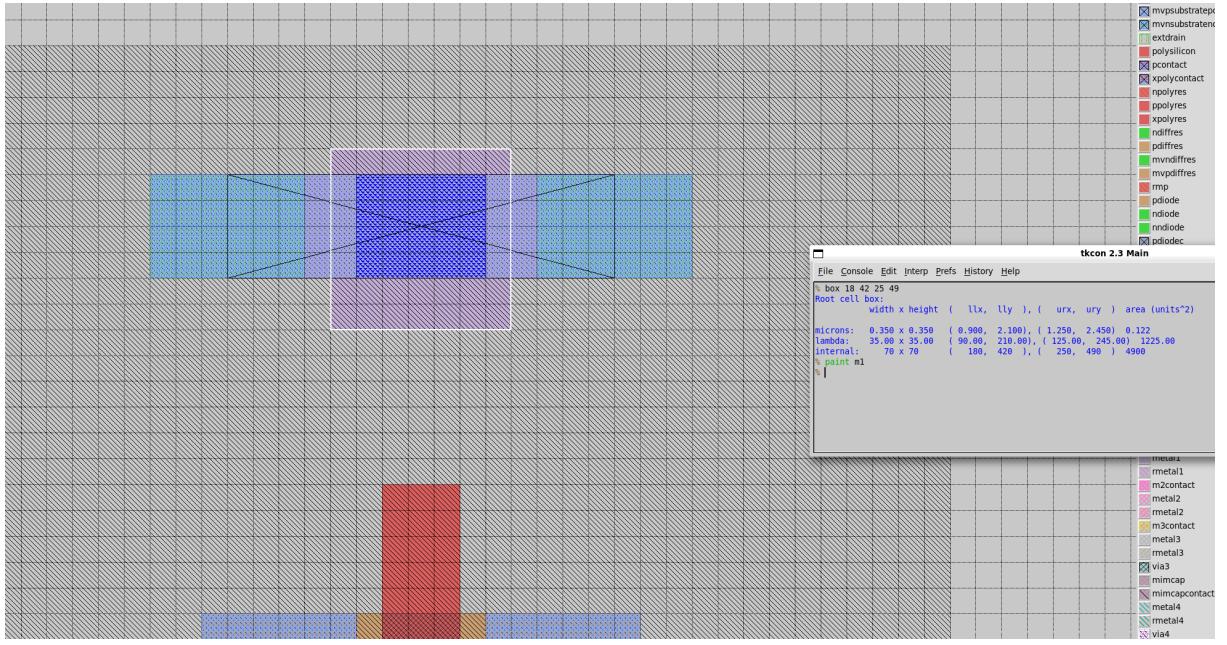


Figura 52: Complemento da conexão com `m1`.

Construção da porta (*gate*): Neste exemplo, optou-se por adicionar apenas um contato para a porta (*gate*). No entanto, é possível adicionar outro contato na parte superior do transistor, conforme a necessidade do projeto.

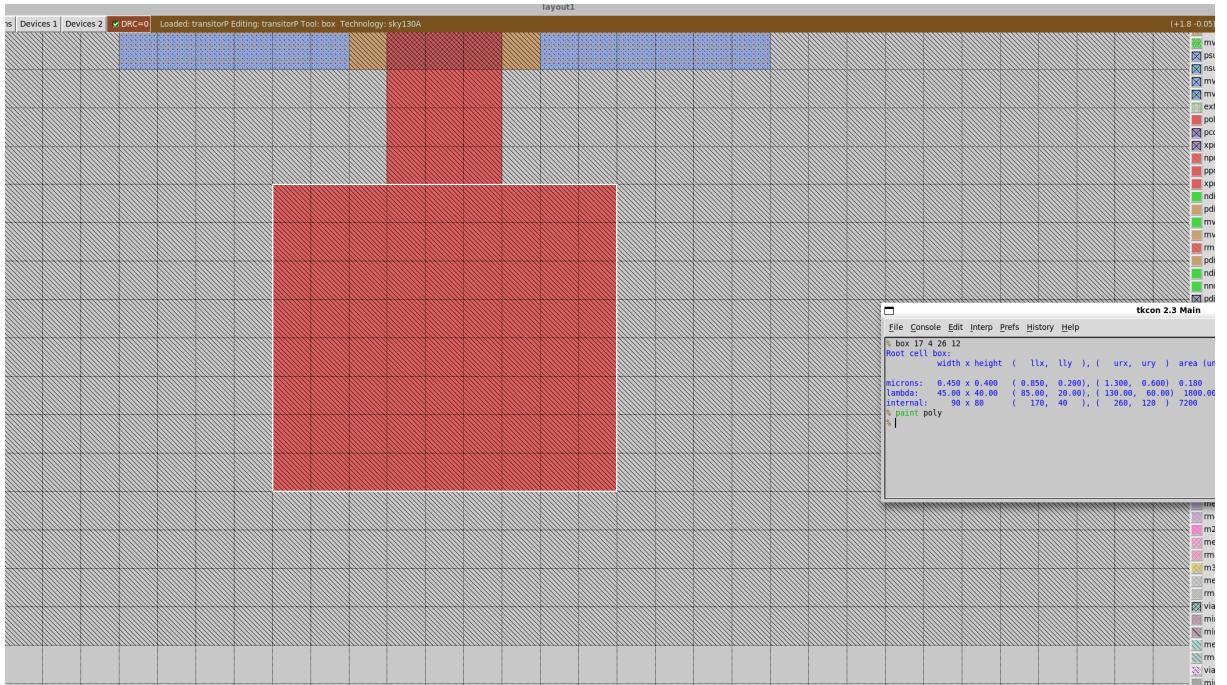


Figura 53: Adicionando extensão do poly para contato com a porta.

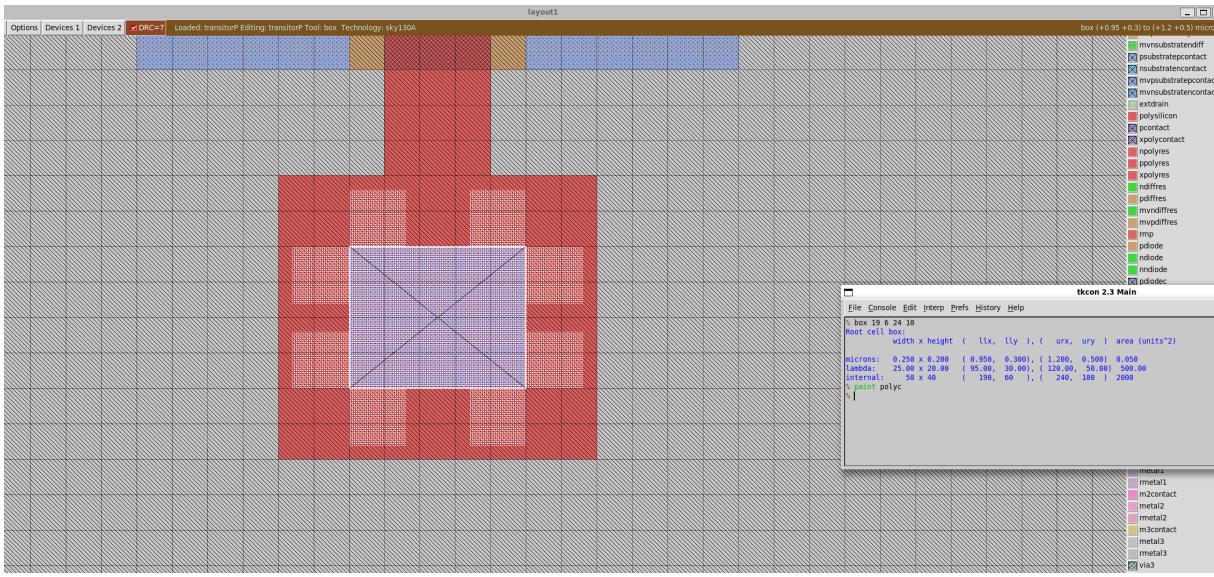


Figura 54: Adicionando contato para o polissilício (polyc).

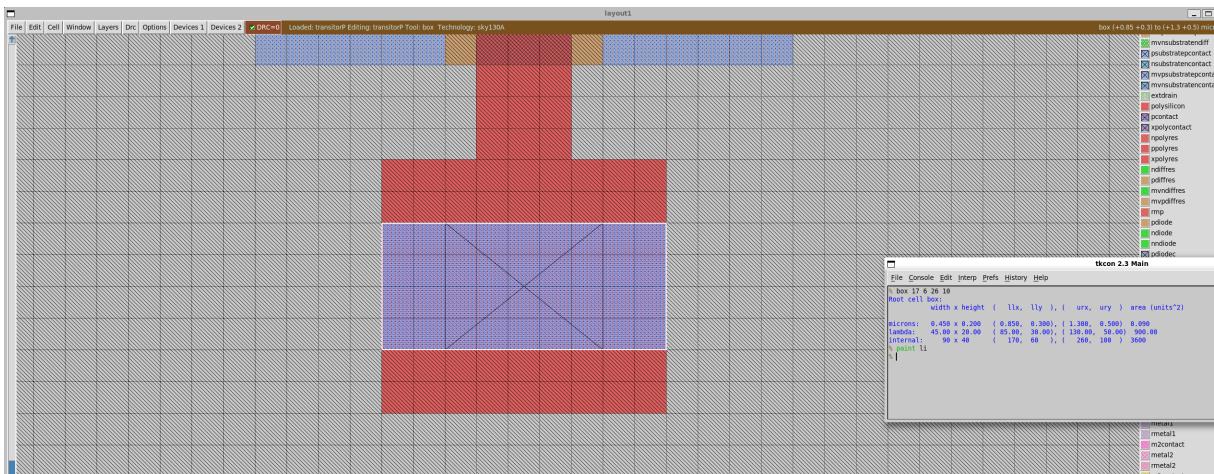


Figura 55: Adicionando li sobre polyc.

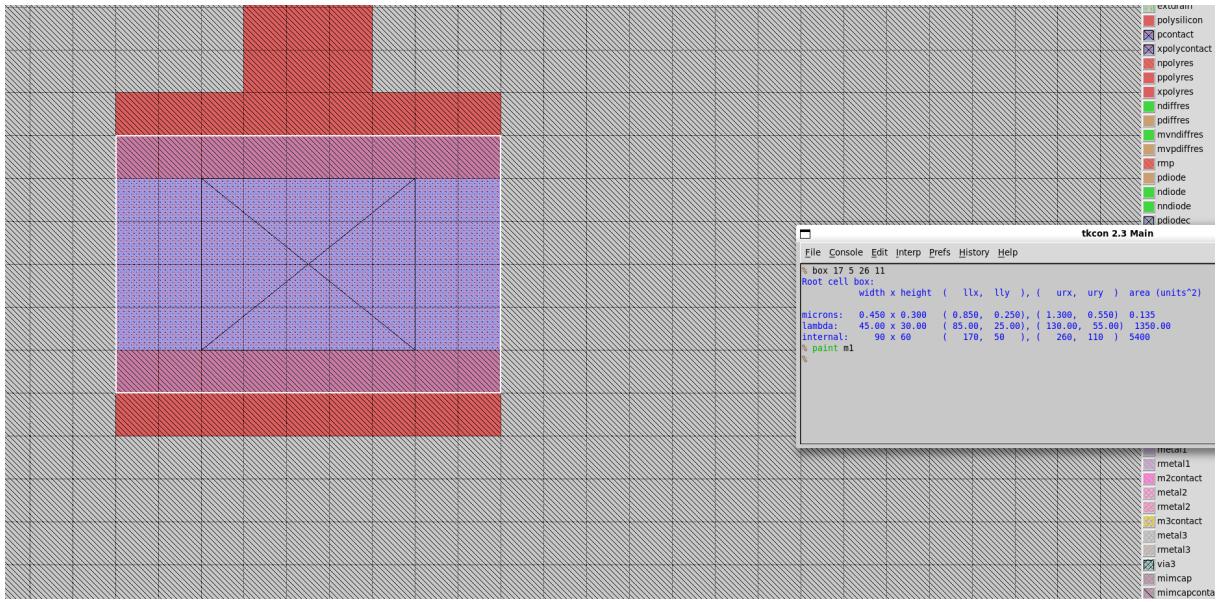


Figura 56: Adicionando m1 sobre o li.

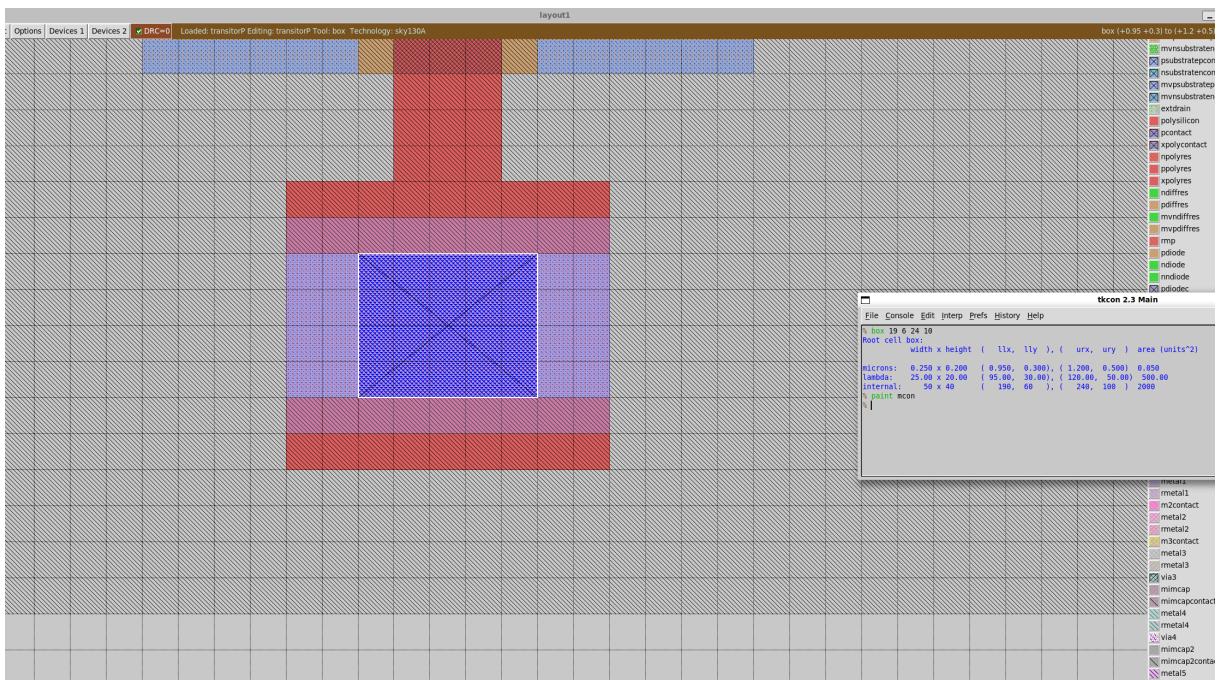


Figura 57: Adicionando mcon sobre m1.

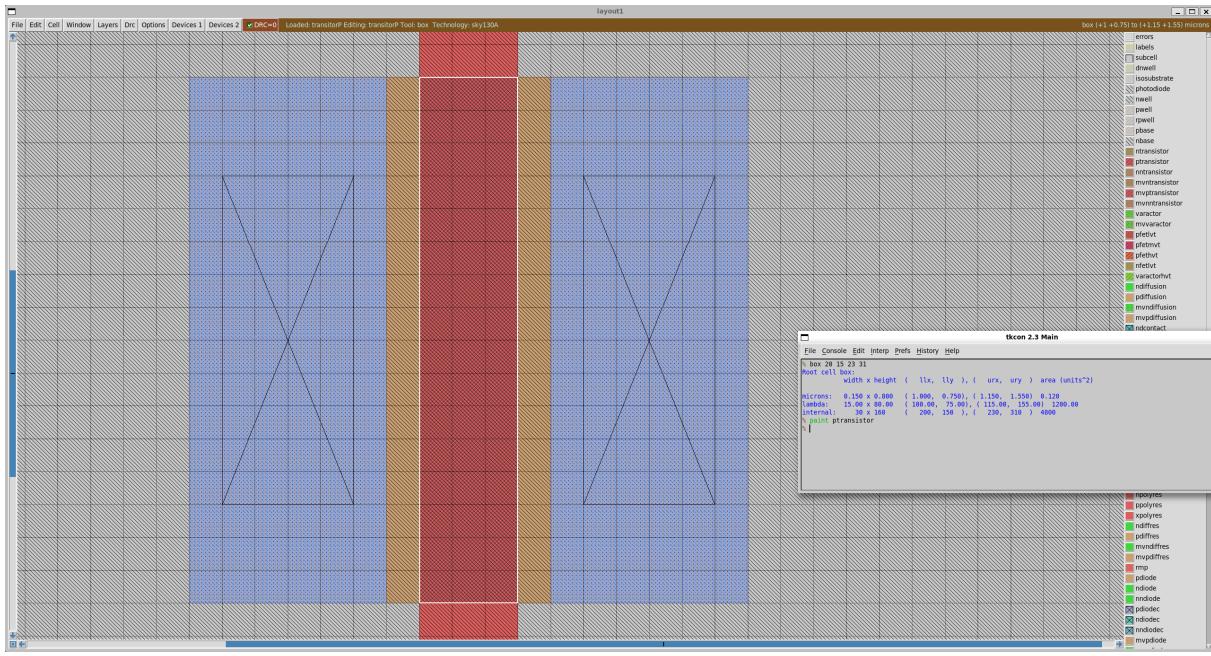


Figura 58: Adicionando a camada ptransistor para indicar ao Magic que se trata de um transistor do tipo *p*.

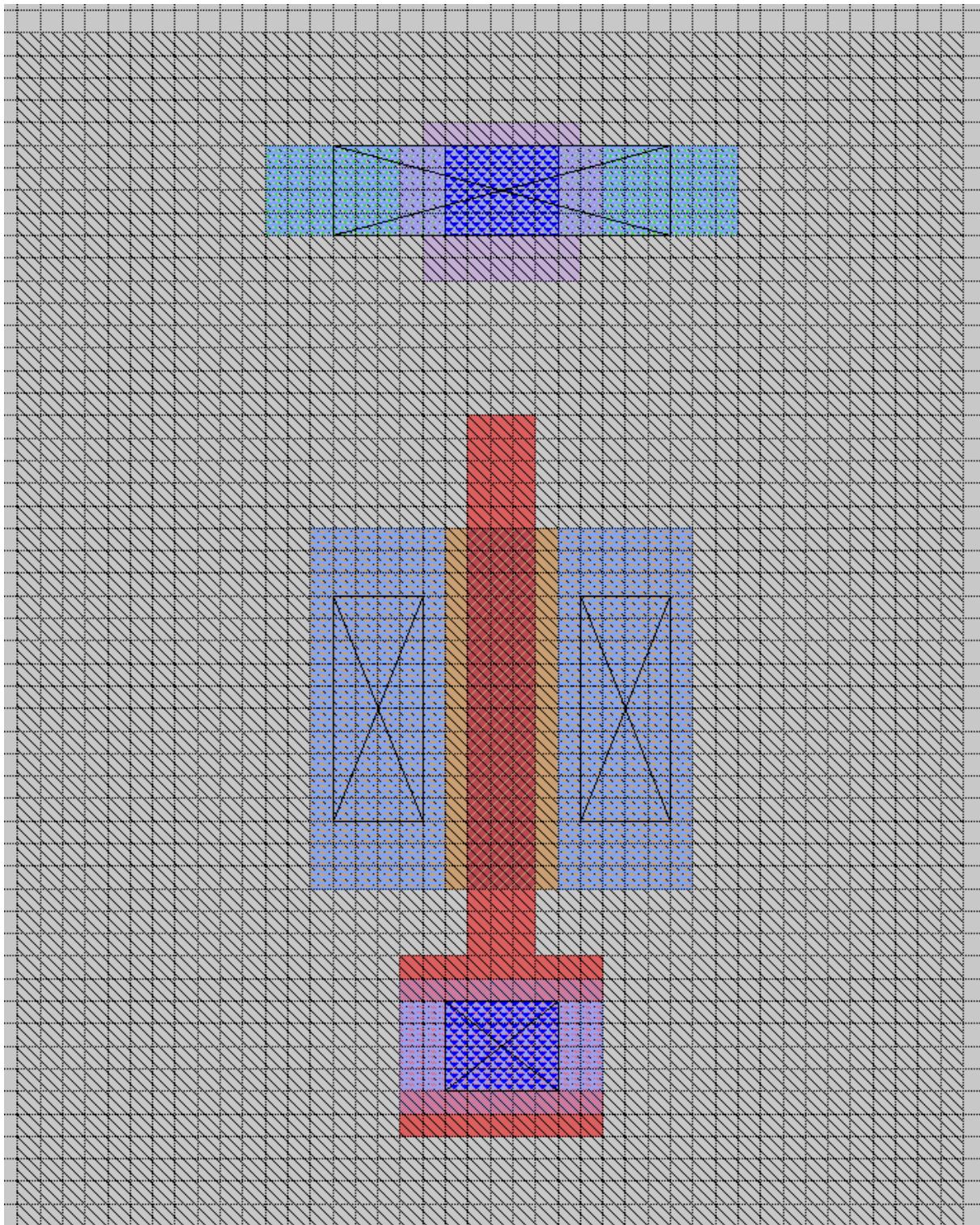


Figura 59: Visualização do transistor tipo-*p* finalizado.

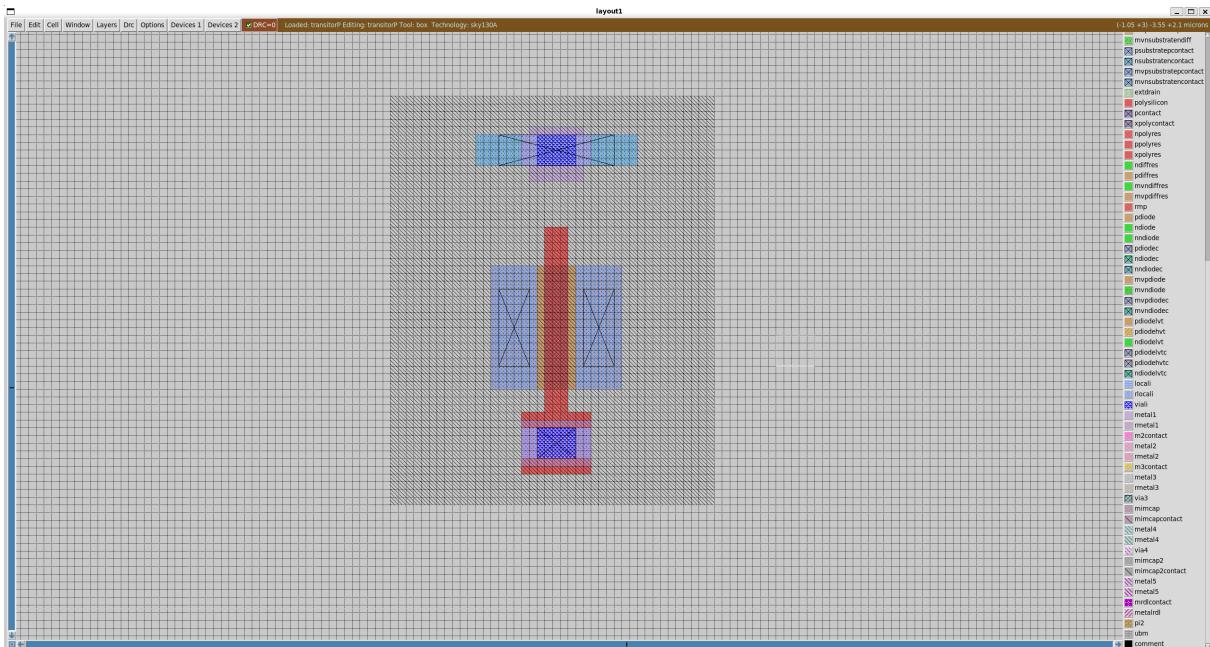


Figura 60: Visualização final do transistor tipo-*p*.

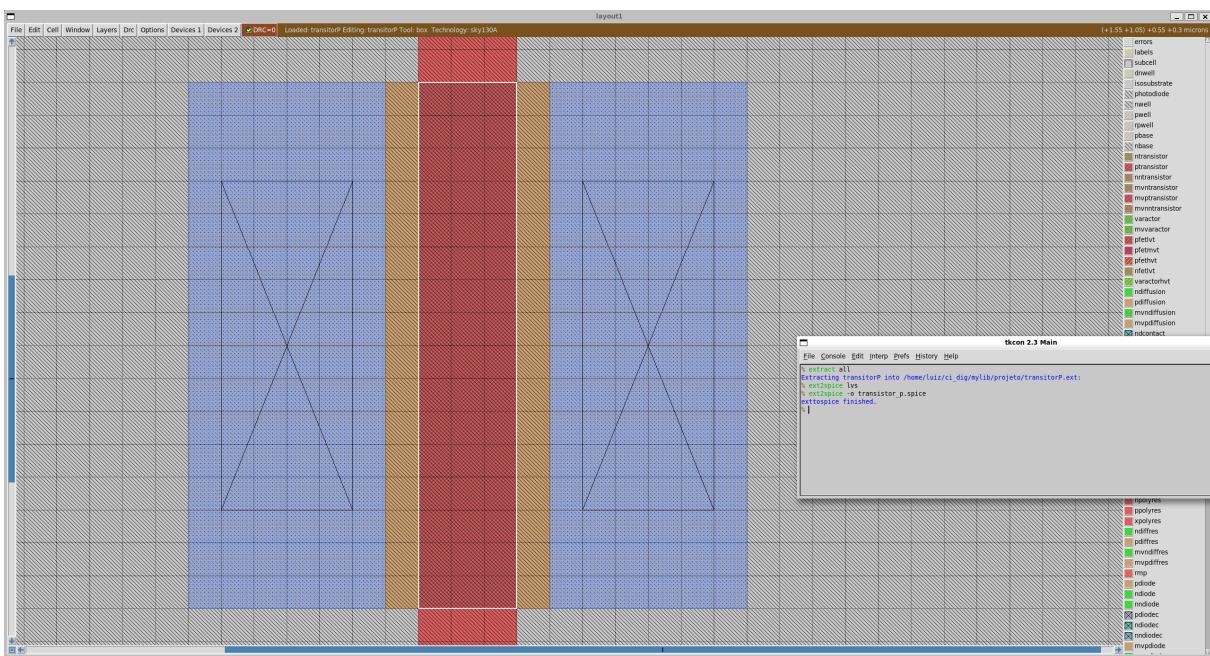


Figura 61: Exportando para SPICE com informações para LVS.

Os comandos apresentados na figura 61 são apresentados abaixo:

```
extract all
ext2spice lvs
ext2spice -o nome_arquivo.spice
```

Considerações Finais

É importante ressaltar que, neste transistor, não há diferenciação entre dreno e fonte em termos de dopagem ou camadas utilizadas. Ou seja, funcionalmente, tanto faz qual

terminal será o dreno ou a fonte.

Para a construção de um transistor do tipo n , basta realizar as seguintes substituições:

- nwell → pwell
- pdiff → ndiff
- pdc → ndc
- ntap → ptap
- ntapc → ptapc
- ptransistor → ntransistor

Entretanto, vale destacar que, na maioria dos processos, a área de desenho já é considerada como sendo de dopagem do tipo p , o que a torna diretamente apropriada para a construção de transistores do tipo n . Dessa forma, a camada pwell pode ser omitida, já que o substrato padrão é naturalmente do tipo p .

6 Erros de DRC

O *Design Rule Check* (DRC) é uma etapa fundamental no projeto de circuitos integrados, pois garante que o layout obedece às regras de fabricação do processo. A seguir, são apresentados alguns exemplos de erros comuns de DRC, detectados durante a criação de layouts no Magic.

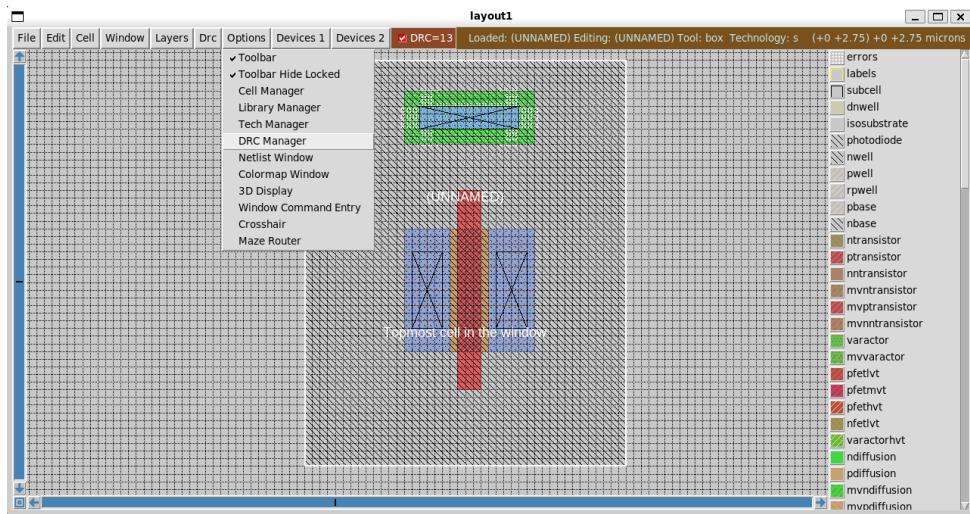


Figura 62: Acesso ao gerenciador de DRC através do menu *Options*.

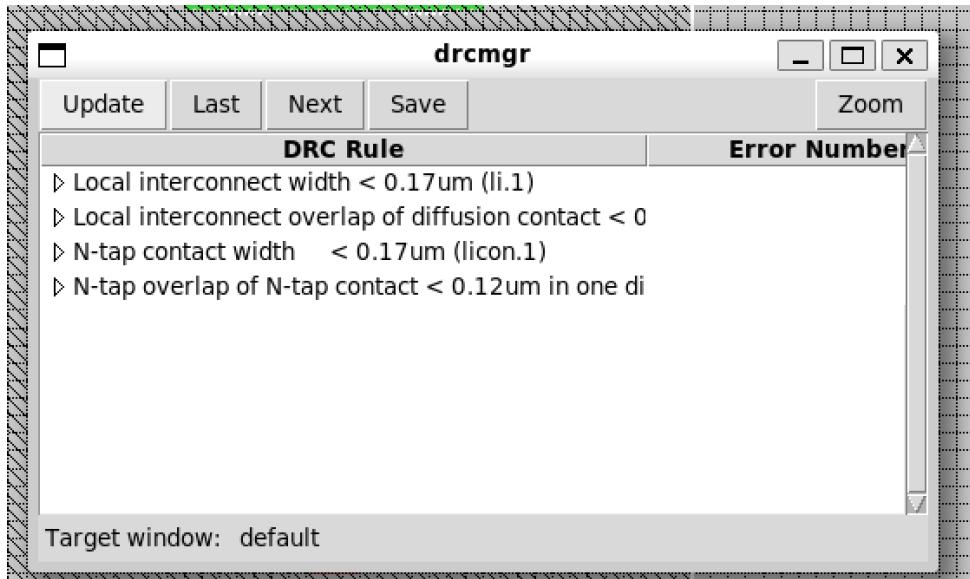


Figura 63: Janela do DRC Manager (DRCMGR) listando todos os erros encontrados no layout.

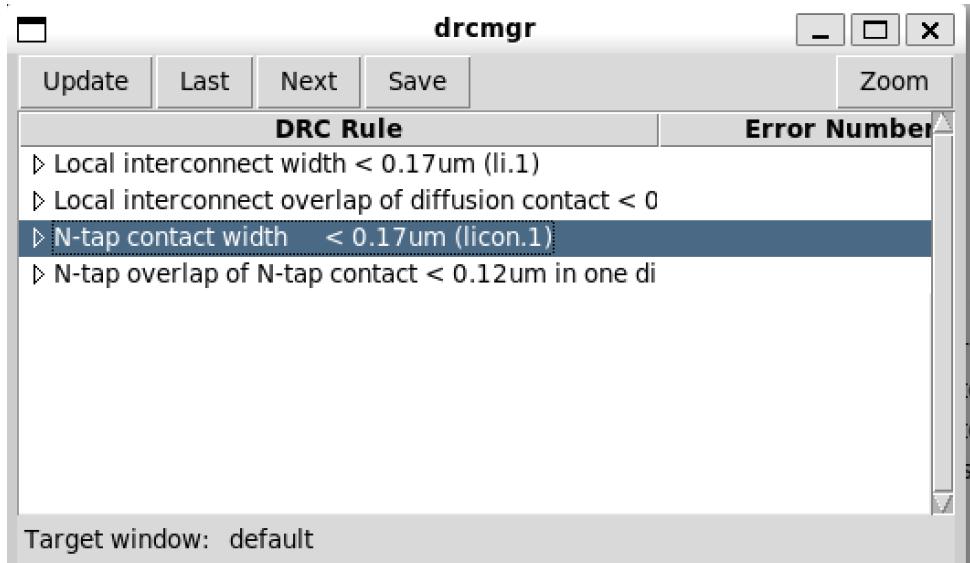


Figura 64: Erro relacionado ao contato ntapc, que exige cobertura mínima com li. O DRC aponta que a área deve ser coberta adequadamente com locali.

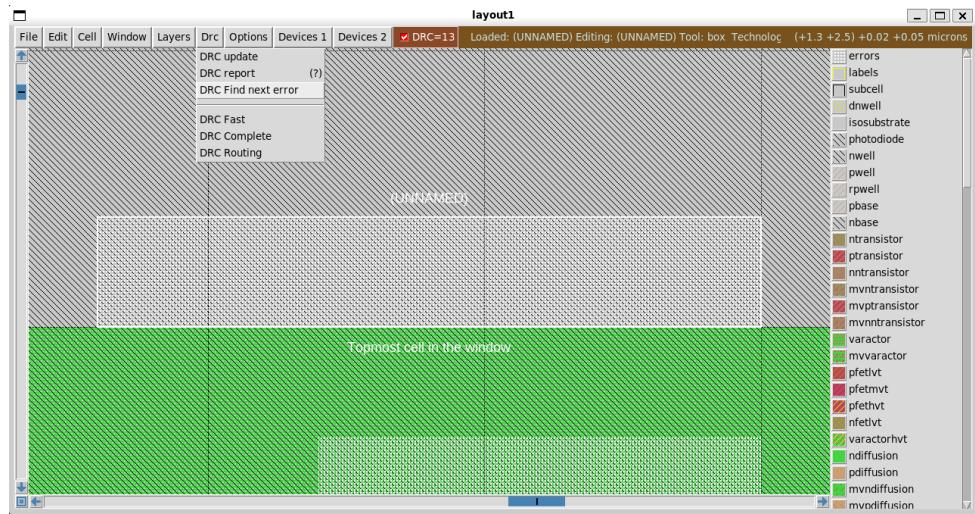


Figura 65: Utilizando a função *Find Next Error* para navegar entre os erros de DRC identificados.

Referências

- [1] Google and SkyWater Technology, “SkyWater open source PDK.” <https://github.com/google/skywater-pdk>, 2020. Accessed: 2025-07-11.
- [2] Google Open Source, “Skywater open source pdk announcement.” <https://www.youtube.com/watch?v=bIuzsE31DNQ>, 2020. YouTube video, accessed: 2025-07-11.
- [3] SkyWater Technology and Google, “SkyWater PDK Documentation,” 2020. Accessed: 2025-07-11.