

Como decompor as instruções virtuais de lógica relacional em instruções nativas, percebendo o porquê.

Começemos por considerar, para a análise que segue, a seguinte notação:

- **A** -> identifica o conteúdo de um registo do MIPS de uso geral expresso em complemento para 2
- **B** -> identifica o conteúdo de um segundo registo de uso geral expresso em complemento para 2
- **UA** -> identifica o conteúdo de um registo do MIPS de uso geral expresso em binário natural
- **UB** -> identifica o conteúdo de um segundo registo de uso geral expresso em binário natural
- **D** -> idêntica um registo que irá armazenar um resultado de uma operação lógica ou aritmética
- **imm** -> identifica uma constante (valor imediato) em complemento para dois
- **uimm** -> identifica uma constante (valor imediato) em binário natural (zero ou positiva)
- **\$AT** -> identifica o registo \$1 (reservado pelo Assembler para a decomposição de instruções virtuais em instruções nativas quando se torna necessário recorrer a um registo temporário)
- As instruções virtuais serão apresentadas em **castanho** (e.g. **bgt A, B, Label**)
- As instruções nativas serão apresentadas em **azul** (e.g. **beq A, B, Label**)

O Assembler do MIPS inclui um conjunto de instruções virtuais para realizar comparações entre o conteúdo de dois registos ou entre o conteúdo de um registo e uma constante. Mais especificamente, constam dessa lista as seguintes instruções:

1.

```

beqz A, Label           # Salta para Label se A for igual a zero
bnez A, Label           # Salta para Label se A for diferente de zero
  
```

No caso destas duas instruções, a comparação de **A** é feita implicitamente com a constante zero, que é também o conteúdo do registo \$0. Logo, as instruções nativas equivalentes serão:

```

beqz A, Label      ->  beq A, $0, Label
bnez A, Label      ->  bne A, $0, Label
  
```

2.

```

beq A, imm, Label      # Salta para Label se A for igual a imm
beq A, uimm, Label     # Salta para Label se A for igual a uimm
bne A, imm, Label      # Salta para Label se A for diferente de imm
bne A, uimm, Label     # Salta para Label se A for diferente de uimm
  
```

No caso destas quatro instruções, a comparação de **A** é feita com uma constante de 16 bits (valor imediato) que pode ou não ter sinal. Logo, para se poder utilizar as instruções nativas, o valor da constante tem de ser previamente copiado para um registo temporário (**\$AT**):

```

beq A, imm, Label  ->  addi $AT, $0, imm  # addi => extensão do sinal de
                        beq A, $AT, Label    # imm #para os bits 31..17 de $AT

beq A, uimm, Label ->  xori $AT, $0, uimm  # xori => bits 31..17 de $AT são
                        bne A, $AT, Label    # mantidos a '0'

bne A, imm, Label  ->  addi $AT, $0, imm  # addi => extensão do sinal de
                        bne A, $AT, Label    # imm para os bits 31..17 de $AT

bne A, uimm, Label ->  xori $AT, $0, uimm  # xori => bits 31..17 de $AT são
                        bne A, $AT, Label    # mantidos a '0'
  
```

3.

```

blt A,B,Label      # Se A < B então salta para Label
blt A,imm,Label     # Se A < imm então salta para Label
bltu UA,UB,Label    # Se UA < UB então salta para Label
bltu UA,uimm,Label  # Se UA < uimm então salta para Label

bgt A,B,Label      # Se A > B então salta para Label
bgt A,imm,Label     # Se A > imm então salta para Label
bgtu UA,UB,Label    # Se UA > UB então salta para Label
bgtu UA,uimm,Label  # Se UA > uimm então salta para Label

ble A,B,Label      # Se A ≤ B então salta para Label
ble A,imm,Label     # Se A ≤ imm então salta para Label
bleu UA,UB,Label    # Se UA ≤ UB então salta para Label
bleu UA,uimm,Label  # Se UA ≤ uimm então salta para Label

bge A,B,Label      # Se A ≥ B então salta para Label
bge A,imm,Label     # Se A ≥ imm então salta para Label
bgeu UA,UB,Label    # Se UA ≥ UB então salta para Label
bgeu UA,imm,Label   # Se UA ≥ uimm então salta para Label

```

Para perceber como decompor estas instruções virtuais em instruções nativas, temos de perceber quais as limitações que o *Assembly* nativo impõe, quer do ponto de vista das instruções nativas disponíveis para o efeito, quer do ponto de vista das regras sintáticas. As instruções que estão disponíveis para implementar todas as condições relacionais acima indicadas são apenas as seguintes:

Instrução Assembly	Código pseudo-C equivalente
<code>slt D, A, B</code> →	<pre> int A, B, D; if (A < B) { D = 1; } else { D = 0; } </pre>
<code>sltu D, UA, UB</code> →	<pre> unsigned int A, B, D; if (UA < UB) { D = 1; } else { D = 0; } </pre>
<code>slti D, A, imm</code> →	<pre> int A, D; if (A < imm) { D = 1; } else { D = 0; } </pre>
<code>sltiu D, UA, uimm</code> →	<pre> unsigned int UA, D; if (UA < uimm) { D = 1; } else { D = 0; } </pre>
<code>beq A, \$0, Label</code> →	<code>if (A == 0) goto Label;</code>
<code>bne A, \$0, Label</code> →	<code>if (A != 0) goto Label;</code>

Tabela 1 – Instruções em *Assembly* nativo que permitem implementar as condições de lógica relacional (>, ≥, < e ≤).

Como se pode perceber da tabela anterior, a principal instrução que nos permite comparar valores faz apenas comparações do tipo $(N < I)$, em que 'N' pode ser **A** ou **UA** e 'I' pode ser **B**, **UB**, **imm** ou **uimm**.

Convém então relembrar as transformações entre as quatro expressões de lógica relacional ($>$, \geq , $<$ e \leq) que permitem obter, a partir de cada uma dessas expressões, uma outra do tipo $(N < I)$:

Caso	Condição	Valor Booleano	\Rightarrow	Condição do tipo $(N < I)$	Valor Booleano
1	$(A > B)$	true	\Rightarrow	$(B < A)$	true ¹
2	$(A < B)$	true	\Rightarrow	$(A < B)$	true
3	$(A \geq B)$	true	\Rightarrow	$(A < B)$	false
4	$(A \leq B)$	true	\Rightarrow	$(B < A)$	false

Tabela 2 – Transformação entre as quatro condições relacionais e uma condição do tipo $(N < I)$ e respetivo resultado booleano.

Se admitirmos que todas as condições testadas são verdadeiras (porque é nesse caso que o *branch* é *taken*), então, dependendo da transformação que teremos de efetuar para obter uma expressão do tipo $(N < I)$ poderemos ter como resultado booleano um valor verdadeiro (casos 1 e 2) ou falso (casos 3 e 4).

Consideremos, como exemplo, o caso 3. O código C (usando um goto) seria:

```
if (A >= B) goto Label;
```

mas, como não temos disponível uma instrução para determinar a condição " \geq ", teremos então de rescrever o código da seguinte forma:

```
if (!(A < B)) goto Label; // neste caso o branch é taken se o resultado
                        // de (A < B) for falso
```

Uma outra limitação imposta pelas instruções nativas do MIPS, resulta do facto de que as instruções que usam como operando um imediato (e.g. `slti $AT, A, imm`) obrigarem a que esse imediato seja sempre o terceiro operando. Ora, em situações como a do caso 1 da tabela 2, a obtenção de uma condição do tipo $(N < I)$ obriga a trocar a ordem dos operandos. Quando os operandos são registos, essa troca não é problema. Mas nos casos em que um operando é um imediato a troca deixa de ser possível já que o imediato tem de ser, obrigatoriamente, o terceiro operando. Para resolver esse problema vai ser necessário começar por copiar o valor imediato para um registo (iremos usar o \$AT). Desta forma passamos a ter os valores a comparar em dois registos e a troca de operandos volta novamente a ser possível.

Antes de construirmos a nossa tabela final, analisemos um exemplo concreto:

```
bgti A, uimm, Label           # caso 1 da tabela 2 usando um imediato
```

Neste caso teríamos de trocar **A** e **uimm** para transformar a condição numa outra da forma $(uimm < A)$. Como não podemos usar um valor imediato como primeiro operando fonte, teremos de usar as seguintes duas instruções:

```
xori $AT, $0, uimm           # $AT passa a ter a constante uimm
slti $AT, $AT, A              # os operandos podem agora ser trocados ($AT < A)
```

se a condição testada pelo "`slti`" for verdadeira, o registo \$AT ficará com o valor '1'. Logo, para executar o *branch*, falta apenas:

```
bne $AT, $0, Label           # salta para Label se ($AT != 0)  $\Rightarrow$  verdadeiro
```

¹ Deve ler-se: Se $(A > B)$ é verdadeiro então $(B < A)$ também é verdadeiro.

A tabela completa com a conversão de todas as instruções de *branch* condicional virtuais em falta será então:

Instrução virtual	Caso (Tabela 2)	Condição p/ branch taken	Instruções nativas	Troca de operandos
blt A,B,Label	2	$\text{true} \Rightarrow \$AT = 1$	<code>slt \$AT, A, B</code> <code>bne \$AT, \$0, Label</code>	Não
blt A,imm,Label	2	$\text{true} \Rightarrow \$AT = 1$	<code>slti \$AT, A, imm</code> <code>bne \$AT, \$0, Label</code>	Não
bltu UA,UB,Label	2	$\text{true} \Rightarrow \$AT = 1$	<code>sltu \$AT, UA, UB</code> <code>bne \$AT, \$0, Label</code>	Não
bltu UA,uimm,Label	2	$\text{true} \Rightarrow \$AT = 1$	<code>sltiu \$AT, UA, uimm</code> <code>bne \$AT, \$0, Label</code>	Não
bgt A,B,Label	1	$\text{true} \Rightarrow \$AT = 1$	<code>slt \$AT, B, A</code> <code>bne \$AT, \$0, Label</code>	Sim
bgt A,imm,Label	1	$\text{true} \Rightarrow \$AT = 1$	<code>addi \$AT, \$0, imm</code> <code>slti \$AT, \$AT, A</code> <code>bne \$AT, \$0, Label</code>	Sim
bgtu UA,UB,Label	1	$\text{true} \Rightarrow \$AT = 1$	<code>sltu \$AT, UB, UA</code> <code>bne \$AT, \$0, Label</code>	Sim
bgtu UA,uimm,Label	1	$\text{true} \Rightarrow \$AT = 1$	<code>xori \$AT, \$0, imm</code> <code>slti \$AT, \$AT, UA</code> <code>bne \$AT, \$0, Label</code>	Sim
ble A,B,Label	4	$\text{false} \Rightarrow \$AT = 0$	<code>slt \$AT, B, A</code> <code>beq \$AT, \$0, Label</code>	Sim
ble A,imm,Label	4	$\text{false} \Rightarrow \$AT = 0$	<code>addi \$AT, \$0, imm</code> <code>slt \$AT, \$AT, A</code> <code>beq \$AT, \$0, Label</code>	Sim
bleu UA,UB,Label	4	$\text{false} \Rightarrow \$AT = 0$	<code>sltu \$AT, UB, UA</code> <code>beq \$AT, \$0, Label</code>	Sim
bleu UA,uimm,Label	4	$\text{false} \Rightarrow \$AT = 0$	<code>xori \$AT, \$0, imm</code> <code>sltu \$AT, \$AT, UA</code> <code>beq \$AT, \$0, Label</code>	Sim
bge A,B,Label	3	$\text{false} \Rightarrow \$AT = 0$	<code>slt \$AT, A, B</code> <code>beq \$AT, \$0, Label</code>	Não
bge A,imm,Label	3	$\text{false} \Rightarrow \$AT = 0$	<code>slti \$AT, A, imm</code> <code>beq \$AT, \$0, Label</code>	Não
bgeu UA,UB,Label	3	$\text{false} \Rightarrow \$AT = 0$	<code>sltu \$AT, UA, UB</code> <code>beq \$AT, \$0, Label</code>	Não
bgeu UA,imm,Label	3	$\text{false} \Rightarrow \$AT = 0$	<code>sltiu \$AT, UA, imm</code> <code>beq \$AT, \$0, Label</code>	Não