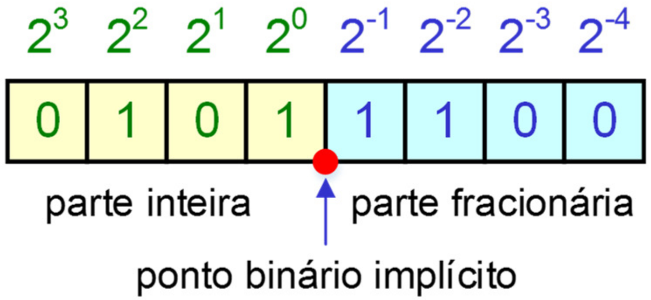
Aulas 11 e 12

- Representação de números em vírgula flutuante
- A norma IEEE 754
  - Operações aritméticas em vírgula flutuante
  - Precisão simples e precisão dupla
  - Arredondamentos
- Unidade de vírgula flutuante do MIPS
  - Instruções da FPU do MIPS

Bernardo Cunha, José Luís Azevedo, Arnaldo Oliveira

Representação de quantidades fracionárias

- A codificação de quantidades numéricas com que trabalhamos até agora esteve sempre associada à representação de números inteiros
- A representação posicional de inteiros pode também ser usada para representar números racionais considerando-se potências negativas da base
- Por exemplo a representação da quantidade 5.75 em base 2 com 4 bits para a parte inteira e 4 bits para a parte fracionária poderia ser:



- Esta representação designa-se por "**representação em vírgula fixa**"

Representação de quantidades fracionárias

- A representação de quantidades fracionárias em vírgula fixa coloca de imediato a questão da divisão do espaço de armazenamento para as partes inteira e fracionária
- O número de dígitos da parte inteira determina a **gama de valores representáveis**
- O número de dígitos da parte fracionária, determina a **precisão** da representação (no exemplo anterior, a menor quantidade representável é $2^{-4} = 0{,}0625$)
- No caso geral, quantos dígitos devem então ser reservados para a **parte inteira** e quantos para a **parte fracionária**, sabendo nós que o espaço de armazenamento é limitado?

Representação de números em Vírgula Flutuante

- **Exemplo**: **-23.45129876** (vírgula fixa). A mesma quantidade pode também ser representada recorrendo à notação científica:

-2.345129876×10^1 $\quad \mathbf{-(2\times10^0+3\times10^{-1}+4\times10^{-2}+5\times10^{-3}+\ldots+6\times10^{-9}) \times 10^1}$

$-0.2345129876 \times 10^2$ $\quad \mathbf{-(0\times10^0+2\times10^{-1}+3\times10^{-2}+4\times10^{-3}+\ldots+6\times10^{-10}) \times 10^2}$

- São representações do mesmo valor em que a posição da vírgula tem de ser ponderada, na interpretação numérica da quantidade, pelo valor do expoente de base 10
- Esta técnica, em que a vírgula pode ser deslocada sem alterar o valor representado, designa-se também por **representação em vírgula flutuante (VF)**
- A representação em VF tem a vantagem de não desperdiçar espaço de armazenamento com os zeros à esquerda da quantidade representada
- No primeiro exemplo, o número de dígitos diferentes de zero à esquerda da vírgula é igual a um: diz-se que a **representação está normalizada**

Representação de números em Vírgula Flutuante

- A representação de quantidades em vírgula flutuante, em sistemas computacionais digitais, faz-se recorrendo à estratégia descrita nos slides anteriores, mas usando agora a base dois:

$$\mathbf{N = (+/-)\ 1.f \times 2^{Exp}}$$

(representação **normalizada** de uma quantidade binária em vírgula flutuante)

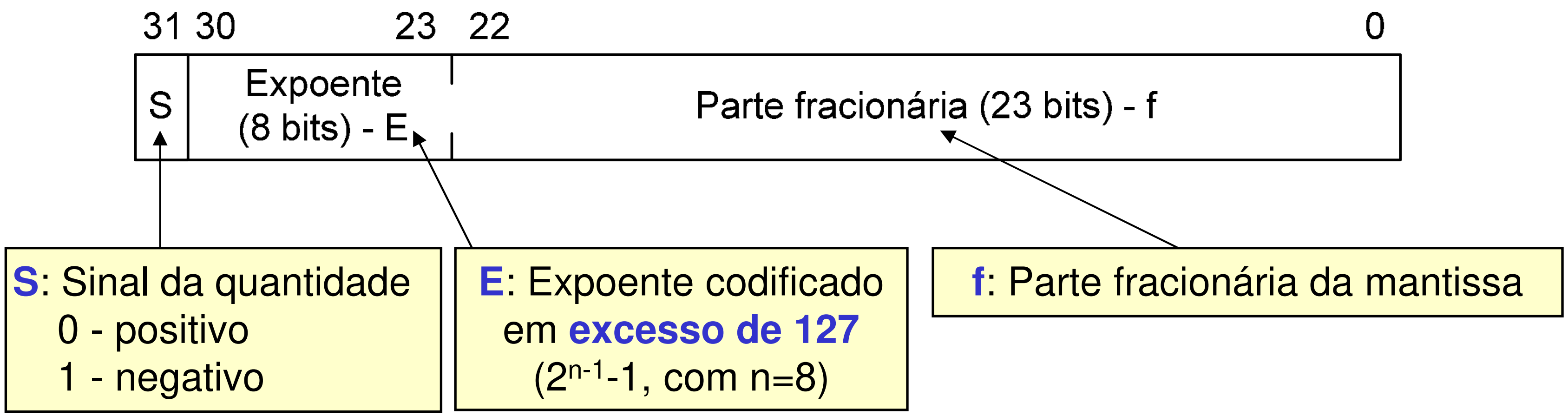
- Em que:

f – parte **fracionária** representada por ***n*** bits
1.f – **mantissa** (também designada por significando)
Exp – **expoente** da potência de base 2 representado por ***m*** bits

Representação de números em Vírgula Flutuante

- O problema da divisão do espaço de armazenamento coloca-se também neste caso, mas agora na determinação do **número de bits** ocupados pela **parte fracionária** e pelo **expoente**
- Essa divisão é um **compromisso** entre **gama de representação** e **precisão**:
  - Aumento do número de bits da parte fracionária $\Rightarrow$ maior precisão na representação
  - Aumento do número de bits do expoente $\Rightarrow$ maior gama de representação
- Um bom design implica compromissos adequados!

Norma IEEE 754 (precisão simples)



- A representação é **normalizada** com o bit à esquerda da vírgula **sempre a 1**. Como é sempre 1, esse bit não é explicitamente representado (***hidden bit***)
- A parte fracionária (23 bits) pode então tomar valores compreendidos entre:

  .00000000000000000000000 e .11111111111111111111111

- E os limites de representação da mantissa (**1.f**) são:

  1.00000000000000000000000 e 1.11111111111111111111111

Norma IEEE 754 (precisão simples)

31	30 … 23	22 … 0
S	Expoente (8 bits) - E	Parte fracionária (23 bits) - f

- O expoente é codificado em **excesso de 127** ($2^{n-1}-1$, n=8 bits). Ou seja, é somado ao expoente verdadeiro (**Exp**) o valor 127 para obter o código de representação (i.e. ***E = Exp + 127***, em que E é o expoente codificado)

$$\mathbf{N = (-1)^S\ 1.f \times 2^{Exp} = (-1)^S\ 1.f \times 2^{E-127}}$$

- O código 127 representa, assim, o expoente zero; códigos maiores do que 127 representam expoentes positivos e códigos menores que 127 representam expoentes negativos
- **Os códigos 0 e 255 são reservados**. O expoente pode, desta forma, tomar valores entre **-126** e **+127** [códigos 1 a 254].

Norma IEEE 754 (precisão simples)

31	30 … 23	22 … 0
S	Expoente (8 bits) - E	Parte fracionária (23 bits) - f

Exemplo: **0 10000010 10110000000000000000000 (0x41580000)**

Sinal = 0 (quantidade positiva)

Expoente = 130 – *offset* = 130 – 127 = 3 ⇔ (Exp = E – *offset*)

Mantissa = (1 + parte fracionária) = **1** + **.1011** = **1.1011**

A quantidade representada (R) se

$R = \mathbf{+1.1011 \times 2^3} = (\mathbf{1} + 1\times\mathbf{2^{-1}} + ($

$= 1.6875 \times 8 = 13.5$

$R = +1.1011 \times 2^3$

$R = 1101.1$ (vírgula fixa)

$(i=1101 = 13_{10} \quad f = 0.1 = 0.5_{10})$

$R = 13.5_{10}$

Norma IEEE 754 (precisão simples)

- **Exemplo**: codificar no formato vírgula flutuante IEEE 754 precisão simples, o valor **-12.59375_{10}**

Parte inteira: $12_{10} = 1100_2$

Parte fracionária: $0.59375_{10} = 0.10011_2$

$12.59375_{10} = 1100.10011_2 \times 2^0$

Normalização: $1100.10011_2 \times 2^0 = 1.10010011_2 \times 2^3$

Expoente codificado: $+3 + 127 = 130_{10} = 10000010_2$

1	10000010	10010011000000000000000

0xC1498000

```
      0.59375
    ×       2
MSb   1.18750
      0.18750
    ×       2
      0.37500
      0.37500
    ×       2
      0.75000
      0.75000
    ×       2
      1.50000
      0.50000
    ×       2
LSb   1.00000
```

Norma IEEE 754 (precisão simples)

- A gama de representação suportada por este formato será portanto:

$$\pm\,[\mathbf{1.00000000000000000000000}\times\mathbf{2^{-126}}\ ,\ \mathbf{1.11111111111111111111111}\times\mathbf{2^{+127}}]$$

$$\pm\,[\mathbf{1.175494}\times\mathbf{10^{-38}},\ \mathbf{3.402824}\times\mathbf{10^{+38}}]$$

- Qual o número de dígitos à direita da vírgula na representação em decimal (casas decimais)?
- Partindo de uma representação com "**n**" dígitos fracionários na base "**r**", o número máximo de dígitos na base "**s**" que garante que a mudança de base não acrescenta precisão à representação original é:

$$m = \left\lfloor n\frac{\log r}{\log s} \right\rfloor$$

$\lfloor . \rfloor$ é o operador *floor*

- Assim, de modo a não exceder a precisão da representação original, a **representação em decimal** deve ter, no máximo, 6 casas decimais:

$$m = \left\lfloor n\frac{\log r}{\log s} \right\rfloor = \left\lfloor 23\frac{\log 2}{\log 10} \right\rfloor = 6$$

- Ou, sabendo que o nº de bits por casa decimal = $\log_2(10) \cong 3.3$), o número de casas decimais é $\lfloor\ 23\ /\ 3.3\ \rfloor$ = **6 casas decimais**

Norma IEEE 754 (precisão simples)

31	30 ... 23	22 ... 0
S	Expoente (8 bits) - E	Parte fracionária (23 bits) - f

- Nas operações com quantidades representadas neste formato podem ocorrer situações de ***overflow*** e de ***underflow***:
  - **Overflow**: quando o expoente do resultado não cabe no espaço que lhe está destinado → **E > 254**)

    $$\mathbf{N_{resultado} > 1.11111111111111111111111 \times 2^{+127}}$$

  - **Underflow**: caso em que o expoente é tão pequeno que também não é representável → **E < 1**)

    $$\mathbf{0 < N_{resultado} < 1.00000000000000000000000 \times 2^{-126}}$$

Norma IEEE 754 – Adição / Subtração

Exemplo: $\mathbf{N = 1.1101 \times 2^0 + 1.0010 \times 2^{-2}}$

1º Passo: **Igualar os expoentes** ao **maior** dos expoentes

$a = 1.1101 \times 2^0 \quad b = 0.010010 \times 2^0$

2º Passo: **Somar / subtrair** as mantissas mantendo os expoentes

$N = 1.1101 \times 2^0 + 0.010010 \times 2^0 = 10.000110 \times 2^0$

3º Passo: **Normalizar** o resultado

$N = 10.000110 \times 2^0 = \mathbf{1.0000110 \times 2^1}$

4º Passo: **Arredondar** o resultado e renormalizar (se necessário)

$N = 1.0000110 \times 2^1 = \mathbf{1.0001 \times 2^1}$

Exemplo com 4 bits fracionários

Norma IEEE 754 – Multiplicação

Exemplo: **N = (1.1100 $\times$ 2^0) $\times$ (1.1001 $\times$ 2^{-2})**

1º Passo: **Somar** os expoentes

Exp. Resultado = 0 + (-2) = -2

2º Passo: **Multiplicar** as mantissas

Mr = 1.1100 $\times$ 1.1001 = 10.101111

3º Passo: **Normalizar** o resultado

N = 10.101111 $\times$ 2^{-2} = **1.0101111 $\times$ 2^{-1}**

4º Passo: **Arredondar** o resultado e renormalizar (se necessário)

N = 1.0101111 $\times$ 2^{-1} = **1.0110 $\times$ 2^{-1}**

Exemplo com 4 bits fracionários

Norma IEEE 754 – Divisão

Exemplo: **N = (1.0010 $\times$ 2^0) / (1.1000 $\times$ 2^{-2})**

1º Passo: **Subtrair** os expoentes

Exp. Resultado = 0 - (-2) = 2

2º Passo: **Dividir** as mantissas

Mr = 1.0010 / 1.1000 = 0.11

3º Passo: **Normalizar** o resultado

$N = 0.11 \times 2^2 = \mathbf{1.1 \times 2^1}$

4º Passo: **Arredondar** o resultado

$N = 1.1 \times 2^1 = \mathbf{1.1000 \times 2^1}$

Exemplo com 4 bits fracionários

Norma IEEE 754 (precisão dupla)

- A norma IEEE 754 suporta a representação de quantidades em **precisão simples (32 bits)** e em **precisão dupla (64 bits)**

31	30 ... 23	22 ... 0	
S	Expoente (8 bits) - E	Parte fracionária (23 bits) - f	**Precisão Simples**

63	62 ... 52	51 ... 0	
S	Expoente (11 bits) - E	Parte fracionária (52 bits) - f	**Precisão Dupla**

$$\mathbf{N = (-1)^{S}\ 1.f \times 2^{(E\,-\,127)}}$$ (Precisão simples - tipo **float**)

$$\mathbf{N = (-1)^{S}\ 1.f \times 2^{(E\,-\,1023)}}$$ (Precisão dupla - tipo **double**)

Norma IEEE 754 (precisão dupla)

63	62 ... 52	51 ... 0
S	Expoente (11 bits) - E	Parte fracionária (52 bits) - f

$$N = (-1)^S\ 1.f \times 2^{\ Exp} = (-1)^S\ 1.f \times 2^{\ E-1023}$$

- A gama de representação suportada pelo formato de precisão dupla será:

$$\pm\ [\mathbf{1.00000000000000000...000 \times 2^{-1022}\ ,\ 1.1111111111111111...111 \times 2^{+1023}}]$$

$$\pm\ [\mathbf{2.225073858507201 \times 10^{-308}\ ,\ 1.797693134862316 \times 10^{+308}}]$$

- De modo a não exceder a precisão da representação original, a **representação em decimal** deve ter, no máximo, $\lfloor 52 / \log_2(10) \rfloor$ = **15 casas decimais**

Norma IEEE 754 – casos particulares

- A norma IEEE 754 suporta ainda a representação de alguns casos particulares:
  - A **quantidade zero**; essa quantidade não seria representável de acordo com o formato descrito até aqui
  - **+/-infinito**. Exemplos: 1.0 / 0.0, -1.0 / 0.0
  - Resultados não numéricos (**NaN – Not a Number**). Exemplo: 0.0 / 0.0
  - Por forma a aumentar a resolução (menor quantidade representável) é ainda possível usar um formato de **mantissa desnormalizada** no qual o bit à esquerda do ponto binário é zero

Norma IEEE 754 – casos particulares

Precisão Simples		Precisão Dupla		Representa
Expoente	Parte Frac.	Expoente	Parte Frac.	
0	0	0	0	0
0	$\neq 0$	0	$\neq 0$	Quantidade desnormalizada
1 a 254	*qualquer*	*1 a 2046*	*qualquer*	*Nº em vírgula flutuante normalizado*
255	0	2047	0	Infinito
255	$\neq 0$	2047	$\neq 0$	NaN (Not a Number)

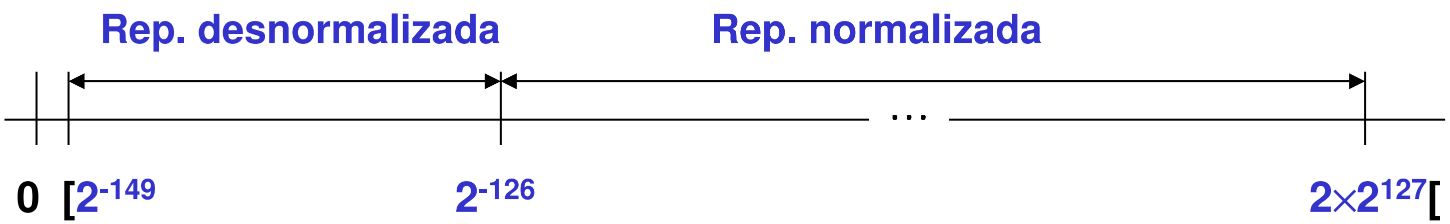
Norma IEEE 754 – representação desnormalizada

- Permite a representação de quantidades cada vez mais pequenas (*underflow* gradual)
- A gama de representação suportada pelo formato de mantissa desnormalizada, em precisão simples, é:

$$\pm\,[\mathbf{0.00000000000000000000001 \times 2^{-126}},\ \mathbf{0.11111111111111111111111 \times 2^{-126}}]$$

$$\pm\,[\mathbf{1 \times 2^{-23} \times 2^{-126}},\ \mathbf{1.0 \times 2^{-126}}[$$

$$\pm\,[1.401299 \times 10^{-45},\ 1.175494 \times 10^{-38}[$$



Técnicas de arredondamento do resultado

- As operações aritméticas são efetuadas com um número de bits da parte fracionária superior ao disponível no espaço de armazenamento
- Desta forma, na conclusão de qualquer operação aritmética é necessário proceder ao arredondamento do resultado por forma a assegurar a sua adequação ao espaço que lhe está destinado
- As técnicas mais comuns no processo de **arredondamento do resultado** (o qual introduz um erro) são:
  - Truncatura
  - Arredondamento simples
  - Arredondamento para o par (ímpar) mais próximo

Técnicas de arredondamento do resultado

- **Truncatura** (exemplo com 2 dígitos na parte fracionária: d=2)

Número	Trunc(x)	Erro
x.00	x	0
x.01	x	-1/4
x.10	x	-1/2
x.11	x	-3/4

Erro médio = (0 – 1/4 – 1/2 – 3/4) / 4

= **–3/8**

- Mantém-se a parte inteira, desprezando qualquer informação que exista à direita do ponto binário

Técnicas de arredondamento do resultado

- **Arredondamento simples** (exemplo com 2 dígitos na parte fracionária: d=2)

Número	Arred(x)	Erro
x.00	x	0
x.01	x	-1/4
x.10	x + 1	+1/2
x.11	x + 1	+1/4

Erro médio = (0 – 1/4 + 1/2 + 1/4) / 4

= **+1/8**

- Mantém-se a parte inteira quando o 1º dígito à direita do ponto binário for 0 ou soma-se "1" à parte inteira quando aquele for "1":

```
arred(x) = trunc(x + 0.5)
```

- O erro médio é mais próximo de zero do que no caso da truncatura, mas ligeiramente polarizado do lado positivo

Técnicas de arredondamento do resultado

- **Arredondamento para o par mais próximo** (exemplo com 2 dígitos na parte fracionária: d=2)

Número	Arred(x)	Erro
x0.00	x0	0
x0.01	x0	-1/4
x0.10	**x0**	**-1/2**
x0.11	X0 + 1	+1/4

Número	Arred(x)	Erro
x1.00	x1	0
x1.01	x1	-1/4
x1.10	**x1 + 1**	**+1/2**
x1.11	x1 + 1	+1/4

- Semelhante à técnica de arredondamento, mas decidindo, para o caso "**xx.10**", em função do primeiro dígito à esquerda do ponto binário
- **Erro médio** = (0 - 1/4 - 1/2 + 1/4) / 4 + (0 - 1/4 + 1/2 + 1/4) / 4
  = -1/8 + 1/8 = 0

Técnicas de arredondamento do resultado

O que fica à direita de b_{23}	Exemplo	Resultado
< 0.5	$1.b_1b_2 \ldots b_{22}b_{23}$ **0111**	***Round down***: bits à direita de b_{23} são descartados
> 0.5	$1.b_1b_2 \ldots b_{22}b_{23}$ **1001**	***Round up***: soma-se 1 a b_{23} (propagando o *carry*)
= 0.5	$1.b_1b_2 \ldots b_{22}$**1 1000**	***Round up***: soma-se 1 a b_{23} (propagando o *carry*) (*)
= 0.5	$1.b_1b_2 \ldots B_{22}$**0 1000**	***Round down***: bits à direita de b_{23} são descartados (*)
= 0.5	$1.b_1b_2 \ldots B_{22}$**1 1000**	***Round down***: bits à direita de b_{23} são descartados (**)
= 0.5	$1.b_1b_2 \ldots b_{22}$**0 1000**	***Round up***: soma-se 1 a b_{23} (propagando o *carry*) (**)

(*) Arredondamento para o **par mais próximo**.

(**) Arredondamento para o **ímpar mais próximo**.

Norma IEEE 754 – arredondamentos

- Os valores resultantes de cada fase intermédia da execução de uma operação aritmética são armazenados com três bits adicionais, à direita do bit menos significativo da mantissa (i.e., para o caso de precisão simples, com pesos 2^{-24}, 2^{-25} e 2^{-26})

?.??????????????????????? G R S (f c/ 26 bits)

- Objetivos: 1) minimizar o erro introduzido pelo processo de arredondamento e 2) ter bits suplementares para a pós-normalização
- **G** – **Guard Bit**
- **R** – **Round bit**
- **S** – **Sticky bit** – Bit que resulta da soma lógica de todos os bits à direita do bit R (i.e., se houver à direita de R pelo menos 1 bit a '1', então S='1')

Norma IEEE 754 – arredondamentos

31	30 … 23	22 … 0			
S	Expoente 8 bits - *E*	Parte fracionária (23 bits)	G	R	S

Guard bit

Round bit

Sticky bit

Exemplo 1 (com f de 5 bits, A + B)

$A = 1.11010 \times 2^0$ **$B = 1.00100 \times 2^{-2}$**

$B = 0.0100100 \times 2^0$ (igualar ao maior dos expoentes)

Mant(A+B) $= 1.11010 + 0.0100100$ Expoente(A+B) = 0

$= \mathbf{10.00011\ 000}$ **G = 0, R = 0, S = 0**

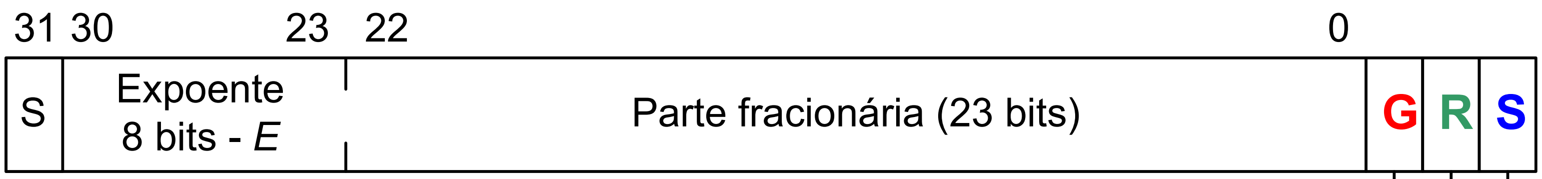
$\text{Mant(A+B)}_{\text{norm}} = \mathbf{1.00001\ \boxed{100}}$ **G = 1, R = 0, S = 0**

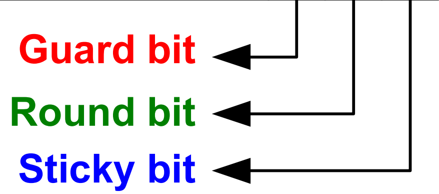
Arredondamento:

Mant(A + B) = 1.00010, se arred. para o par mais próximo ($R=1.00010 \times 2^1$)

Mant(A + B) = 1.00001, se arred. para o ímpar mais próximo ($R=1.00001 \times 2^1$)

Norma IEEE 754 – arredondamentos





Exemplo 2 (com f de 5 bits, A / B)

A = 1.00001×2^2 **B = 1.11111×2^{-1}**

Mant(A/B) = 1.00001 / 1.11111 Expoente(A/B) = 2 – (-1) = 3

= **0.10000 1100001** **G = 1**, **R = 1**, **S = OR(00001) = 1**

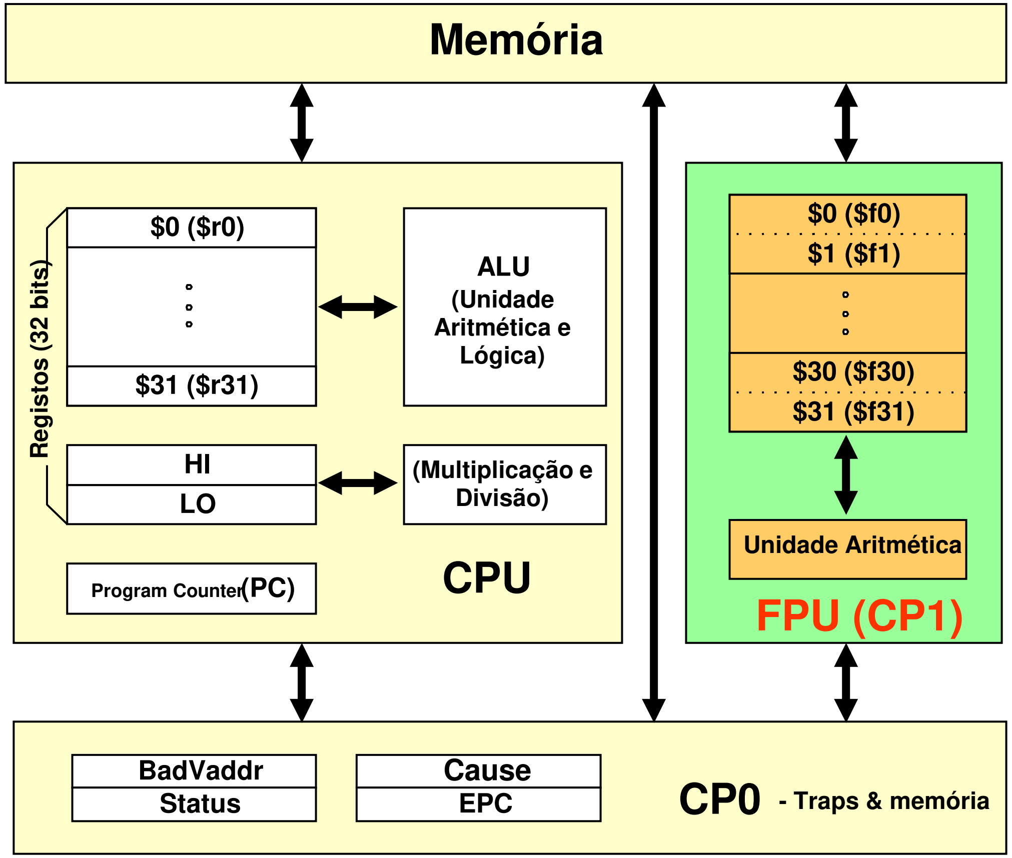
= **0.10000 111**

Mant(A/B) $_{norm}$ = **1.00001 110** Arred($1,11_2$) = 10_2

Arredondamento $\Rightarrow$ Mant(A/B) = 1.00010

A/B = $1.00010 \times \mathbf{2^2}$

Cálculo em Vírgula Flutuante no MIPS



- O MIPS inclui um coprocessador aritmético (Coprocessador 1) capaz de efetuar operações aritméticas em vírgula flutuante, usando a norma IEEE 754

- Esse coprocessador tem o seu próprio espaço de armazenamento composto por um conjunto de 32 registos de 32 bits cada, e o seu próprio conjunto de instruções (ISA)

Vírgula Flutuante no MIPS – registos

- Os registos do coprocessador aritmético são designados, no *Assembly* do MIPS, pelas letras **$fn**, em que o indíce **n** toma valores entre 0 e 31
- Cada par de registos consecutivos [**$fn,$fn+1**] (**com n par**) pode funcionar como um registo de 64 bits para armazenar valores em **precisão dupla**.
- Em *Assembly* a referência ao par de registos faz-se indicando como operando o **registo par**
- **Apenas os registos de índice par** podem ser usados no contexto das instruções

Vírgula Flutuante no MIPS – instruções aritméticas

```
abs.p    FPdst,FPsrc               # Absolute Value
neg.p    FPdst,FPsrc               # Negate
div.p    FPdst,FPsrc1,FPsrc2       # Divide
mul.p    FPdst,FPsrc1,FPsrc2       # Multiply
add.p    FPdst,FPsrc1,FPsrc2       # Addition
sub.p    FPdst,FPsrc1,FPsrc2       # Subtract
```

O sufixo **.p** representa a **precisão** com que é efetuada a operação (simples ou dupla). Deverá, na instrução, ser substituído pelas letras **.s** ou **.d** respetivamente.

Vírgula Flutuante no MIPS – conversão entre tipos

```
cvt.d.s FPdst,FPsrc      # Convert Single to Double
cvt.d.w FPdst,FPsrc      # Convert Integer to Double
cvt.s.d FPdst,FPsrc      # Convert Double to Single
cvt.s.w FPdst,FPsrc      # Convert Integer to Single
cvt.w.d FPdst,FPsrc      # Convert Double to Integer
cvt.w.s FPdst,FPsrc      # Convert Single to Integer
```

Formato original

Formato do resultado

As **conversões** entre tipos de representação **são efetuadas pela FPU** pelo que apenas podem ter como operandos/destinos registos da FPU

Conversão entre tipos – exemplos

```
$f0=0xC0D00000 = 11000000110100000000000000000000
               = 11000000110100000000000000000000
               = -1.625 x 2^2 = -6.5
cvt.d.s $f6,$f0
    Exp = (129-127) + 1023 = 1025 = 10000000001
    $f6=0x00000000 $f7=1 10000000001 1010000...0
    $f6=0x00000000 $f7=0xC01A0000

cvt.w.s $f8,$f0
    Exp = (129-127) = 2
    Val = -1.625 x 2^2 = -6.5, (int)(-6.5) = -6
    $f8=0xFFFFFFFA
```

Vírgula Flutuante no MIPS – instruções de transferência

- **Transferência de informação** entre registos do CPU e da FPU, e entre registos da FPU

Registo do **CPU** | Registo da **FPU**

```
mtc1   CPUSrc,FPdst   # Move to Coprocessor 1
mfc1   CPUdst,FPsrc   # Move from Coprocessor 1
mov.s  FPdst, FPsrc   # Move from FPsrc to FPdst (single)
mov.d  FPdst, FPsrc   # Move from FPsrc to FPdst (double)
```

Estas instruções copiam o conteúdo integral do registo fonte para o registo destino.

Não efetuam qualquer tipo de conversão entre tipos de informação.

Vírgula Flutuante no MIPS – instruções de transferência

- **Transferência de informação** entre registos da FPU e a memória

Registo da **FPU** | **Endereço de memória**

```
lwc1   FPdst, offset(CPUreg) # Load single from memory
swc1   FPsrc, offset(CPUreg) # Store single into memory
ldc1   FPdst, offset(CPUreg) # Load double from memory
sdc1   FPsrc, offset(CPUreg) # Store double into memory
```

Instruções virtuais (apenas muda a mnemónica):

```
l.s    FPdst, offset(CPUreg) # Load single from memory
s.s    FPsrc, offset(CPUreg) # Store single into memory
l.d    FPdst, offset(CPUreg) # Load double from memory
s.d    FPsrc, offset(CPUreg) # Store double into memory
```

Vírgula Flutuante no MIPS – instruções de decisão

- A tomada de decisões envolvendo quantidades em vírgula flutuante realiza-se de forma distinta da utilizada para o mesmo tipo de operação envolvendo quantidades inteiras
- Para quantidades em vírgula flutuante são necessárias duas instruções em sequência: uma **comparação das duas quantidades, seguida da decisão** (que usa a informação produzida pela comparação):
  - A instrução de comparação coloca a **True** ou **False** uma *flag* (1 bit), dependendo de a condição em comparação ser verdadeira ou falsa, respetivamente
  - Em **função do estado dessa *flag*** a instrução de decisão (instrução de salto) pode alterar a sequência de execução

Cálculo em Vírgula Flutuante no MIPS

- **Instruções de comparação**:

```
c.x.s   FPUreg1, FPUreg2   # compare single
c.x.d   FPUreg1, FPUreg2   # compare double
```

Em que **x** pode ser uma das seguintes condições:

```
EQ – equal
LT – less than
LE – less or equal
```

- **Instruções de salto**:

```
bc1t   # branch if true
bc1f   # branch if false
```

Vírgula Flutuante no MIPS – instruções de decisão

```
    float a, b;
    ...

    if( a > b)
       a = a + b;
    else
       a = a - b;
```

```
# $f0 ← a
# $f2 ← b
...
if:    c.le.s $f0, $f2         # if(a > b)
       bc1t   else             # {
       add.s  $f0, $f0, $f2    #      a = a + b;
       j      endif            # }
                               # else
else:  sub.s  $f0, $f0, $f2    #      a = a - b;
endif:...
```

Convenções quanto à utilização de registos

- Registos para **passar parâmetros** para funções:
  - **`$f12 ($f13), $f14 ($f15)`**
- Registos para **devolução de resultados** das funções:
  - **`$f0 ($f1), $f2 ($f3)`**
- Registos para **caller saved** não preservados pelas funções:
  - **`$f4 ($f5) a $f18 ($f19)`**
- Registos para **callee saved** preservados pelas funções:
  - **`$f20 ($f21) a $f30 ($f31)`**

Cálculo em Vírgula Flutuante no MIPS – Exemplo

```c
double average(double *, int);

void main(void)
{
   static double array[SIZE];
   double avg;
   ...
   avg = average( array, SIZE );
   printDouble( avg );      // syscall 3
}

double average(double *v, int N)
{
   double av = 0.0;
   int i;

   for(i = 0; i < N; i++)
      av += v[i];
   return av / (double)N;
}
```

Tradução C / Assembly

```c
void main(void)
{
   static double array[SIZE];
   double avg;
   ...
   avg = average( array, SIZE );
   printDouble( avg );      // syscall 3
}
```

```c
double average(double *, int)
```

```
        .data
array: .space n                # n = 8 * SIZE
        .text
        .globl main
main:   ...                    # void main(void) {
        la      $a0, array     #
        li      $a1, SIZE      #
        jal     average        #
        mov.d   $f12, $f0      #    avg = average(array, SIZE)
        li      $v0, 3         #
        syscall                #    print_double(avg)
        ...
        jr      $ra            # }
```

Tradução C / Assembly

```c
double average(double *v, int N)
{
   double av = 0.0;
   int i;
   for(i = 0; i < N; i++)
      av += v[i];
   return av / (double)N;
}
```

```
# $f0 ← av
func:  mtc1     $0,  $f0          #
       cvt.d.w  $f0, $f0          # av = 0.0
       li       $t0, 0            # i = 0
for:   bge      $t0, $a1, endf    # while(i < N) {
       sll      $t1, $t0, 3       #
       addu     $t1, $t1, $a0     #   $t1 = &v[i]
       l.d      $f4, 0($t1)       #   $f0 = v[i]
       add.d    $f0, $f0, $f4     #   av += v[i]
       addi     $t0, $t0, 1       #   i++
       j        for               # }
endf:  mtc1     $a1, $f4          #
       cvt.d.w  $f4, $f4          # $f4 = (double)N
       div.d    $f0, $f0, $f4     #
       jr       $ra               #
```