Dinâmica 22/09/2022 a 22/09/2022
Modelo Numérico da Atmosfera

MET-576-4

Modelagem Numérica da Atmosfera

Dr. Paulo Yoshio Kubota

Os métodos numéricos, formulação e parametrizações utilizados nos modelos atmosféricos serão descritos em detalhe.

3 Meses
24 Aulas (2 horas cada)

Modelo Numérico da Atmosfera

- ✓ **Métodos de diferenças finitas.**
- ✓ **Acurácia.**
- ✓ **Consistência.**
- ✓ **Estabilidade.**
- ✓ **Convergência.**
- ✓ **Grades de Arakawa A, B, C e E.**
- ✓ **Domínio de influência e domínio de dependência.**
- ✓ **Dispersão numérica e dissipação.**
- ✓ **Definição de filtros monótono e positivo.**
- ✓ **Métodos espectrais.**
- ✓ **Métodos de volume finito.**
- ✓ **Métodos Semi-Lagrangeanos.**
- ✓ **Conservação de massa local.**
- ✓ **Esquemas explícitos versus semi-implícitos.**
- ✓ **Métodos semi-implícitos.**

O Esquema CTCS (Leapfrog)

Um outro método para resolver o problema de advecção linear. É usar o esquema centrada no tempo, Centrado no espaço (CTCS). i.e.

$$\frac{\phi_j^{n+1} - \phi_j^{n-1}}{2\Delta t} + u\frac{\phi_{j+1}^n - \phi_{j-1}^n}{2\Delta x} = 0\,. \qquad (17)$$

Trata-se de uma fórmula de três-nível, uma vez que ela envolve valores de $\emptyset$ em três tempos t_{n+1}, t_n, t_{n-1}.

O esquema CTCS é de precisão de segunda ordem no espaço e no tempo. análise de estabilidade Von Neumann

Define-se $\emptyset = A^n e^{ikj\Delta x}$ para a análise de estabilidade de Von Neumann, que veremos em seguida

$$\emptyset_j^{n+1} = \emptyset_j^{n-1} - u\frac{\Delta t}{\Delta x}\left(\emptyset_{j+1}^n - \emptyset_{j-1}^n\right)$$

$$A^{n+1}e^{ikj\Delta x} = A^{n-1}e^{ikj\Delta x} - u\frac{\Delta t}{\Delta x}\left(A^n e^{ik(j+1)\Delta x} - A^n e^{ik(j-1)\Delta x}\right)$$

O Esquema CTCS (Leapfrog)

$$A^{n+1}e^{ikj\Delta x} = A^{n-1}e^{ikj\Delta x} - u\frac{\Delta t}{\Delta x}\left(A^n e^{ik(j+1)\Delta x} - A^n e^{ik(j-1)\Delta x}\right)$$

$$A^n A e^{ikj\Delta x} = \frac{A^n}{A}e^{ikj\Delta x} - u\frac{\Delta t}{\Delta x}\left(A^n e^{ikj\Delta x}e^{ik\Delta x} - A^n e^{ikj\Delta x}e^{-ik\Delta x}\right)$$

$$A^n A e^{ikj\Delta x} = \frac{A^n}{A}e^{ikj\Delta x} - C\left(A^n e^{ikj\Delta x}e^{ik\Delta x} - A^n e^{ikj\Delta x}e^{-ik\Delta x}\right)$$

$$A^n A e^{ikj\Delta x} = \frac{A^n}{A}e^{ikj\Delta x} - CA^n e^{ikj\Delta x}\left(e^{ik\Delta x} - e^{-ik\Delta x}\right)$$

$$A = \frac{1}{A} - C\left(e^{ik\Delta x} - e^{-ik\Delta x}\right)$$

$$A^2 = 1 - C2i\left(\frac{e^{ik\Delta x} - e^{-ik\Delta x}}{2i}\right)A$$

$$A^2 = 1 - C2i(\sin(k\Delta x))A$$

$$A^2 = 1 - C2i(\sin(k\Delta x))A$$

$$A^2 + C2i(\sin(k\Delta x))A - 1 = 0$$

$$A^2 - C2i(\sin(k\Delta x))A - 1 = 0$$

$$\boxed{\begin{cases} ax^2 + bx + c = 0 \\ x = \dfrac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \end{cases}}$$

$$A = \frac{C2i(\sin(k\Delta x)) \pm \sqrt{(-C2i(\sin(k\Delta x)))^2 - 4(1)(-1)}}{2}$$

$$A = \frac{C2i(\sin(k\Delta x)) \pm \sqrt{((-1)^2 C^2 4(\sqrt{-1}^2)(\sin^2(k\Delta x)))^2 + 4}}{2}$$

$$A = \frac{C2i(\sin(k\Delta x)) \pm \sqrt{-4C^2 \sin^2(k\Delta x) + 4}}{2}$$

$$A = Ci(\sin(k\Delta x)) \pm \sqrt{-C^2 \sin^2(k\Delta x) + 1}$$

$$A = Ci(\sin(k\Delta x)) \pm \sqrt{1 - C^2 \sin^2(k\Delta x)}$$

Há dois casos a considerar: o primeiro C > 1, e $\left(Csin(k\Delta x)\right)^2 > 1$

$$A = Ci(\sin(k\Delta x)) \pm i\sqrt{C^2 \sin^2(k\Delta x) - 1}$$

$$|A|^2 = \left(Ci(\sin(k\Delta x)) \pm i\sqrt{C^2 \sin^2(k\Delta x) - 1}\right)\left(-Ci(\sin(k\Delta x)) \pm -i\sqrt{C^2 \sin^2(k\Delta x) - 1}\right)$$

$$|A|^2 = \left(Ci(\sin(k\Delta x)) \pm i\sqrt{C^2 \sin^2(k\Delta x) - 1}\right)\left(-Ci(\sin(k\Delta x)) \pm -i\sqrt{C^2 \sin^2(k\Delta x) - 1}\right)$$

$$|A|^2 = i\left(C(\sin(k\Delta x)) \pm \sqrt{C^2 \sin^2(k\Delta x) - 1}\right)\left(-i\left(C(\sin(k\Delta x)) \pm \sqrt{C^2 \sin^2(k\Delta x) - 1}\right)\right)$$

$$\left|A_\pm\right|^2 = \left(C(\sin(k\Delta x)) \pm \sqrt{C^2 \sin^2(k\Delta x) - 1}\right)^2$$

Existe pelo menos uma raiz em que $\left|A_\pm\right| > 1$ **, portanto, a solução é instável** $C > 1$

2. $C \leq 1$ **e** $C\left(sin(k\Delta x)\right) \leq 1$**. As duas raízes são:**

$$A = Ci(\sin(k\Delta x)) \pm i\sqrt{C^2 \sin^2(k\Delta x) - 1}$$

$$A = Ci(\sin(k\Delta x)) \pm \sqrt{1 - C^2 \sin^2(k\Delta x)}$$

$$|A_+|^2 = \left(Ci(\sin(k\Delta x)) + \sqrt{1 - C^2 \sin^2(k\Delta x)}\right)\left(-Ci(\sin(k\Delta x)) + \sqrt{1 - C^2 \sin^2(k\Delta x)}\right)$$

$$|A_+|^2 = \left(-i^2 C^2 \sin^2(k\Delta x) + \ Ci(\sin(k\Delta x)) * \left(\sqrt{1 - C^2 \sin^2(k\Delta x)}\right) - Ci(\sin(k\Delta x)) * \left(\sqrt{1 - C^2 \sin^2(k\Delta x)}\right) + 1 - C^2 \sin^2(k\Delta x)\right)$$

$$|A_+|^2 = (C^2 \sin^2(k\Delta x) + 1 - C^2 \sin^2(k\Delta x))$$

$$|A_+|^2 = 1$$

Da mesma forma para $|A_-|^2$

$$|A_+|^2 = (C^2 \sin^2(k\Delta x) + 1 - C^2 \sin^2(k\Delta x))$$

$$|A_+|^2 = 1$$

$\therefore$ A condição de estabilidade é $\left|C = \frac{u\Delta t}{\Delta x}\right| \leq 1$.

Modo computacional de CTCS

Há dois casos a considerar: o primeiro C > 1, e $\left(Csin(k\Delta x)\right)^2 > 1$

$$A_{\pm} = Csin(k\Delta x) \pm \sqrt{C^2 sin^2(k\Delta x) - 1}$$

$$\geq 0$$

$$A_p = Csin(k\Delta x) + \sqrt{C^2 sin^2(k\Delta x) - 1}$$

$$A_c = Csin(k\Delta x) - \sqrt{C^2 sin^2(k\Delta x) - 1}$$

$$\phi_j^n = A^n e^{ikj\Delta x}$$

$$\phi_j^n = PA_p^n e^{ikj\Delta x} + CA_c^n e^{ikj\Delta x}$$

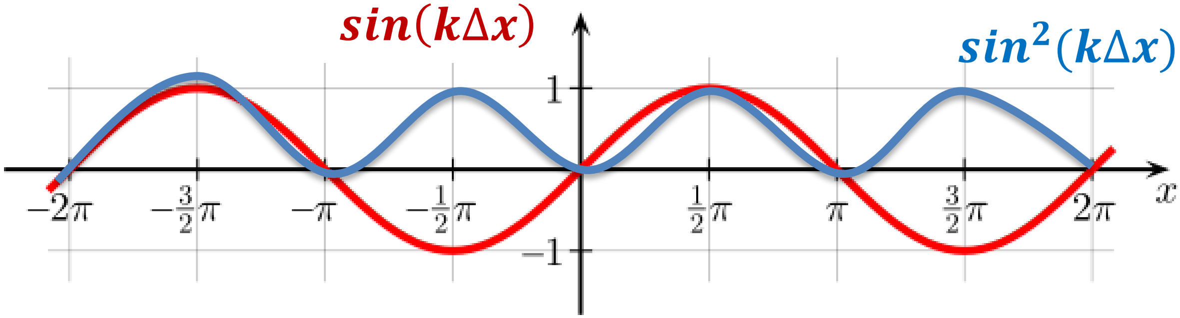
Modo computacional de CTCS

O esquema CTCS dá dois valores para A

$$\geq 0$$

$$A_p = iCsin(k\Delta x) + i\sqrt{C^2 sin^2(k\Delta x) - 1}$$

$$A_c = iCsin(k\Delta x) - i\sqrt{C^2 sin^2(k\Delta x) - 1}$$



$$A_p = -ic\sin k\Delta x + (1 - (c\sin k\Delta x)^2)^{1/2} \quad (18)$$

$$A_c = -ic\sin k\Delta x - (1 - (c\sin k\Delta x)^2)^{1/2} \, , \quad (19)$$

Modo computacional de CTCS

Portanto, a forma geral da solução numérica é

$$\phi_j^n = PA_p^n e^{ikj\Delta x} + CA_c^n e^{ikj\Delta x}$$

$$\phi_j^n = [P(A_p)^n + C(A_c)^n]e^{ikj\Delta x} \quad \textbf{(20)}$$

Vamos escolher C = 1. Em seguida, é conveniente escrever A na forma

$$A_p = e^{-i\alpha} \, , A_c = -e^{i\alpha}$$

Onde $\alpha = k\Delta x = uk\Delta t$ **(21)**

$$\phi_j^n = Pe^{ik(j\Delta x - un\Delta t)} + (-1)^n Ce^{ik(j\Delta x + un\Delta t)} \, .$$

Nos casos em que P e C sejam constantes complexas , determinados pela primeira Condições ou seja, t=0 (n= 0).

$$\phi_j^0 = e^{ikj\Delta x} = (P + C)e^{ikj\Delta x} \Rightarrow (P + C) = 1$$

$$\Rightarrow \phi_j^n = \underbrace{(1-C)e^{ik(j\Delta x - un\Delta t)}}_{Physical \quad mode} + \underbrace{(-1)^n C e^{ik(j\Delta x + un\Delta t)}}_{Computational \quad mode} \qquad (22)$$

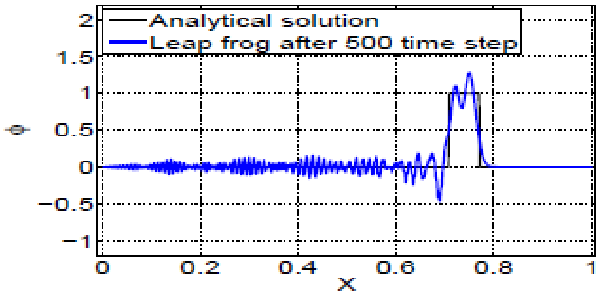
O modo Físico é proporcional à solução exata $e^{Ik(x-ut)}$

O modo computacional não correspondem a qualquer solução da equação diferencial original ; ela é um artefato do Método numérico.

Duas das características do modo computacional

- **Ela oscila no tempo de um passo tempo para o próximo passo de tempo (por causa do fator $(-1)^N$)**

- **Se propaga na direção oposta à verdadeira solução (Por causa do termo $+un\Delta t$ na exponencial ao invés de $-Un\Delta t$).**



Modo computacional e o filtro RA

- A solução ϕ_j^{n+1} Depende, ϕ_j^{n-1} Mas não no ϕ_j^n
- Exceto no momento inicial, a solução é encontrada em dois conjuntos de pontos que não são associados.
- Em qualquer ponto J a solução oscila entre os duas soluções Desatrelada.
- Para manter a amplitude do modo computacional pequenas é Necessário soluções acopladas sobre os dois conjuntos alternando de Pontos de grade.
- A maneira mais comum de se fazer isto no modelo Atmosférica é através do Uso do filtro de Robert-Asselin (RA), que fortemente descarrega as Oscilação $\phi^{n+1} = \phi^{n-1} - [\text{other terms}]$
- Calcular o deslocamento do filtro ou seja
  $d = \alpha * (\phi^{n-1} - 2\phi^n + \phi^{n+1})$
- Aplicar o filtro para Φ^N Ou seja

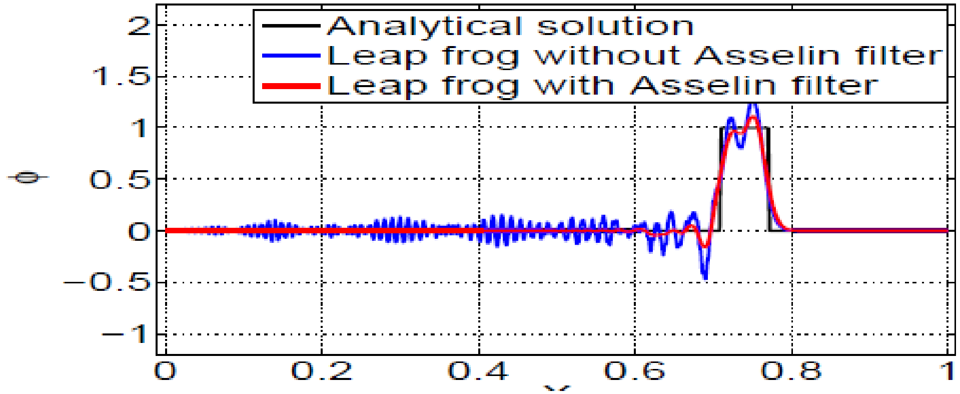
$$\hat{\phi}^n = \phi^n + d = (1 - 2\alpha)\phi^n + \alpha(\phi^{n+1} + \phi^{n-1})$$

Então, atualize $\hat{\phi}^{n-1}$ por $\hat{\phi}^{n}$ e $\hat{\phi}^{n}$ por ϕ^{n+1} Para a próxima iteraçã

Depois de aplicar o filtro, o esquema de advecção fica parecido co

$$\phi^{n+1} = \hat{\phi}^{n-1} - [\text{other terms}]$$

A figura abaixo mostra advecção de uma onda quadrada (com C= 0,7) após 500 tempo passo com (linha vermelha) e sem (azul Linha) apresentando Asselin filtro de tempo.



Note que este filtro também induz a um amortecimento artificial do modo físico, alfa Devem ser mantidos pequenos (na parcela acima alfa = 0,05)

filtro RAW - Williams (2009), MWR

Método RAW, que devemos aplicar a filtragem não somente em Φ^N mas também em Φ^{n+1}

Tal como antes, use primeiro o esquema leapfrog como antes

$$\phi^{n+1} = \phi^{n-1} - [\text{other terms}]$$

Em seguida, aplica-se o filtro

$$\hat{\phi}^{n} = \phi^{n} + d\beta$$

$$\hat{\phi}^{n+1} = \phi^{n+1} + d(\beta - 1)$$

Depois da implementação do filtro e depois atualizar

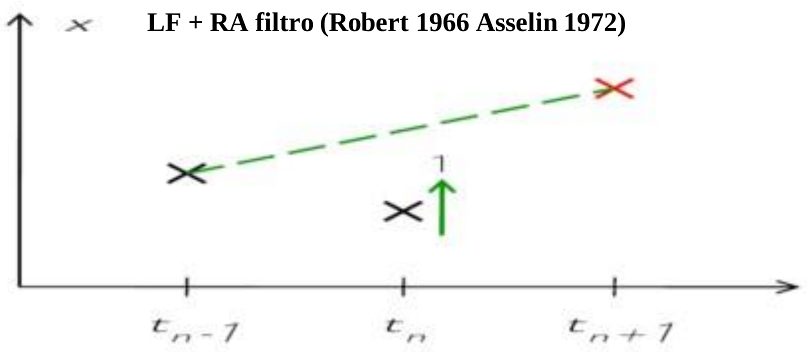
$$\hat{\phi}^{n-1} \Leftarrow \hat{\phi}^{n}$$

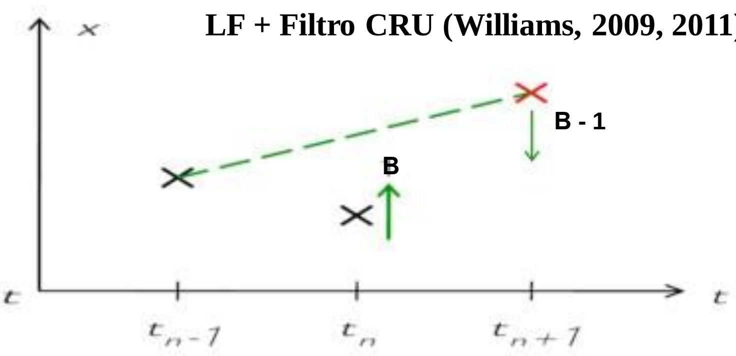
$$\hat{\phi}^{n} \Leftarrow \hat{\phi}^{n+1}$$

$$\phi^{n+1} = \hat{\phi}^{n-1} - [\text{other terms}]$$

Devido à estabilidade razão , o valor beta é 0,5 < beta ≤ 1

O filtro RA vs RAW

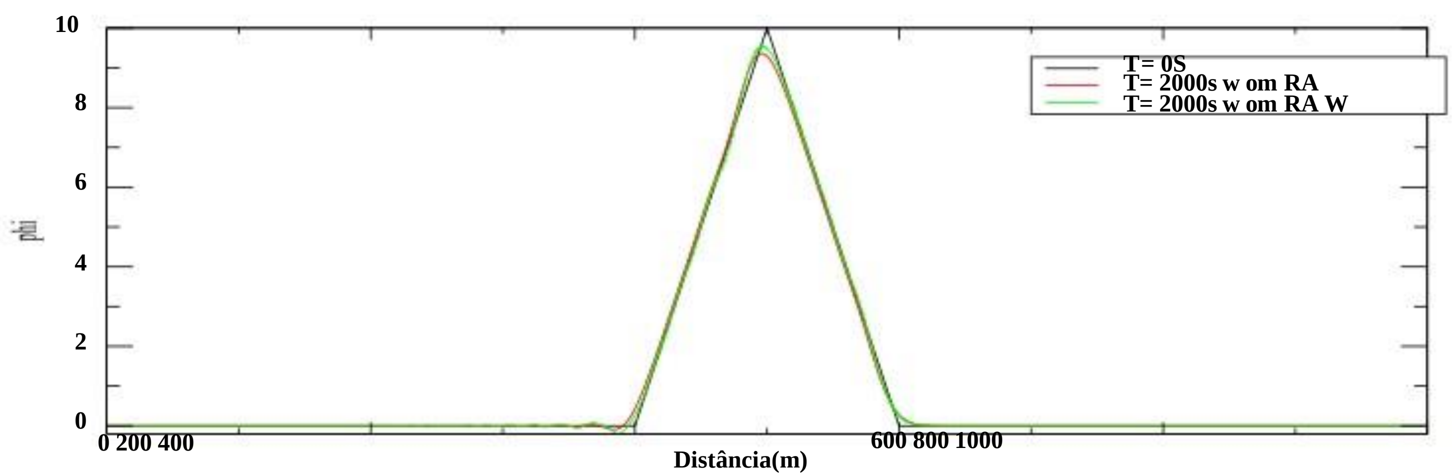




- RA filtro aplica-se em
- Reduz curvatura mas não conserva a curvatura media
- Precisão da amplitude é 1.º ordem

- Filtro-RWA aplica-se em x^n e x^{n+1}
- Reduz e ao mesmo tempo, conserva a curvatura média (para B= 1/2)
- Precisão da amplitude é ≈ 3.ª ordem

Salto com Vcto RA _and_RA W _filter soc ial e dt=0,5, a alfa=0,05, beta=0,6



Exercício

- Resolver a equação advecção 10 numericamente no domínio $0 \leq X \leq 1000$M. Deixe $\Delta x = 1$ M, e assuma As condições limite periódicos . Suponha que a velocity de advecção $U = 1$ M/s.
  Deixe o estado inicial ser um triângulo

$$\Phi(x,0) = \begin{cases} 0 & \text{Para } X < 400 \\ 0.1\,(X - 400) & \text{Para } 400 \leq X \leq 500 \\ 20 - 0.1\,(x - 400) & \text{Para } 500 \leq X \leq 600 \\ 0 & \text{Para } X > 600 \end{cases}$$

Escolha o intervalo de tempo, que o sistema seja estável. Integrar Para 2000seg usando os seguintes esquemas, e mostrar as soluções para T = 0S T = 200s, T = 400S T = 600S T = 800S T = 1000S T = 1200S T = 1400S T = 1600S T = 1800S T = 2000S.

1. Leap frog com a RA esquema filtro de tempo (use alfa = 0,25)
2. Leap frog com matérias-primas regime filtro de tempo(Beta = 0,60 e Beta = 1,0))

Filtro RA

```fortran
MODULE Class_Fields
  IMPLICIT NONE
  PRIVATE
  INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER  :: r8=8
  INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER  :: r4=4
  REAL (KIND=r8),PUBLIC ,ALLOCATABLE :: PHI_P(:)
  REAL (KIND=r8),PUBLIC ,ALLOCATABLE :: PHI_C(:)
  REAL (KIND=r8),PUBLIC ,ALLOCATABLE :: PHI_M(:)
  REAL (KIND=r8),PUBLIC ,ALLOCATABLE :: Deslc(:)
  REAL (KIND=r8),PUBLIC              :: Uvel
  INTEGER        ,PUBLIC              :: iMax
  REAL (KIND=r8),PUBLIC              :: alfa
  PUBLIC :: Init_Class_Fields

CONTAINS
!------------------------------------------------------------------------------------
-----
  SUBROUTINE Init_Class_Fields(xdim,Uvel0,alfa_in)
    IMPLICIT NONE
    INTEGER          , INTENT (IN   ) :: xdim
    REAL (KIND=r8), INTENT (IN   ):: Uvel0
    REAL (KIND=r8), INTENT (IN   ):: alfa_in
    iMax=xdim
    Uvel=Uvel0
    alfa=alfa_in
    ALLOCATE (PHI_P(-1:iMax+2))
    ALLOCATE (PHI_C(-1:iMax+2))
    ALLOCATE (PHI_M(-1:iMax+2))
    ALLOCATE (Deslc(-1:iMax+2))
  END SUBROUTINE Init_Class_Fields
!------------------------------------------------------------------------------------
-----
END MODULE Class_Fields
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```fortran
MODULE Class_NumericalMethod
  USE Class_Fields, Only : PHI_P,PHI_C,PHI_M,Deslc,Uvel,iMax,alfa
 IMPLICIT NONE
 PRIVATE
 INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER :: r8=8
 INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER :: r4=4
 REAL (KIND=r8) :: Dt
 REAL (KIND=r8) :: Dx
 PUBLIC :: InitNumericalScheme
 PUBLIC :: SchemeForward
 PUBLIC :: SchemeUpdate
 PUBLIC :: SchemeUpStream
 PUBLIC :: Filter_RA

CONTAINS
!------------------------------------------------------------------------------------
 SUBROUTINE InitNumericalScheme(dt_in,dx_in)
   IMPLICIT NONE
   REAL (KIND=r8), INTENT (IN   ) :: dt_in
   REAL (KIND=r8), INTENT (IN   ) :: dx_in
   INTEGER :: i
   Dt=dt_in
   Dx=dx_in
   DO i=-1,iMax+2
     IF (i*dx < 400.0) THEN
       PHI_C(i)= 0.0
     ELSE IF ( i*dx >= 400.0 .AND. i*dx <= 500.0 ) THEN
       PHI_C(i)= 0.1*(i*dx -400.0)
     ELSE IF( i*dx >= 500.0 .AND. i*dx <= 600.0 )THEN
       PHI_C(i)= 20.0 - 0.1*(i*dx -400.0)
     ELSE IF( i*dx > 600.0 )THEN
       PHI_C(i)= 0.0
     END IF
   END DO
   PHI_M=PHI_C
   PHI_P=PHI_C
 END SUBROUTINE InitNumericalScheme
```

```
!-------------------------------------------------------------------------------------
-----
 FUNCTION SchemeForward()  RESULT(ok)
   IMPLICIT NONE
   ! Utilizando a diferenciacao forward
   !
   ! F(j,n+1) - F(j,n)       F(j+1,n) - F(j,n)
   !------------------- + u ------------------- = 0
   !       dt                      dx
   !
   INTEGER :: ok
   INTEGER :: j
   DO j=1,iMax
     PHI_P(j) = PHI_C(j) - (Uvel*Dt/Dx)*(PHI_C(j+1)-PHI_C(j))
   END DO
   CALL UpdateBoundaryLayer()
 END FUNCTION SchemeForward

!-------------------------------------------------------------------------------------
-----
 FUNCTION SchemeUpStream()  RESULT (ok)
   IMPLICIT NONE
   ! Utilizando a diferenciacao forward no tempo e
   ! backward no espaco (upstream)
   !
   ! F(j,n+1) - F(j,n)       F(j,n) - F(j-1,n)
   !------------------- + u ------------------- = 0
   !       dt                      dx
   !
   INTEGER :: ok
   INTEGER :: j
   DO j=1,iMax
     PHI_P(j) = PHI_C(j) - (Uvel*Dt/Dx)*(PHI_C(j)-PHI_C(j-1))
   END DO
   CALL UpdateBoundaryLayer()
 END FUNCTION SchemeUpStream
```

```
!-------------------------------------------------------------------------------------
-----
 FUNCTION Filter_RA()  RESULT (ok)
   IMPLICIT NONE
   INTEGER :: i
   INTEGER :: ok
   DO i=-1,iMax+2
     Deslc(i) = alfa*(PHI_M(i) - 2.0*PHI_C(i) + PHI_P(i) )
     PHI_C(i) = PHI_C(i) + Deslc(i)
   END DO
   ok=0
 END FUNCTION Filter_RA

!-------------------------------------------------------------------------------------
-----
 SUBROUTINE UpdateBoundaryLayer()
   IMPLICIT NONE
   PHI_P(0)      =  PHI_P(iMax )
   PHI_P(-1)     =  PHI_P(iMax-1)
   PHI_P(imax+1) =  PHI_P(1)
   PHI_P(iMax+2) =  PHI_P(2)
 END  SUBROUTINE UpdateBoundaryLayer
!-------------------------------------------------------------------------------------
-----
 FUNCTION SchemeUpdate()  RESULT (ok)
   IMPLICIT NONE
   INTEGER :: ok
   PHI_M=PHI_C
   PHI_C=PHI_P
   ok=0
 END FUNCTION SchemeUpdate
!-------------------------------------------------------------------------------------
-----
END MODULE Class_NumericalMethod
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
MODULE Class_WritetoGrads
 USE Class_Fields, Only: PHI_P,PHI_C,PHI_M,Uvel,iMax
 IMPLICIT NONE
 PRIVATE
  INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER  :: r8=8
  INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER  :: r4=4
  INTEGER                , PARAMETER :: UnitData=1
  INTEGER                , PARAMETER :: UnitCtl=2
  CHARACTER (LEN=400)              :: FileName
  LOGICAL                          :: CtrlWriteDataFile
  PUBLIC :: SchemeWriteCtl
  PUBLIC :: SchemeWriteData
  PUBLIC :: InitClass_WritetoGrads
CONTAINS
 SUBROUTINE InitClass_WritetoGrads()
   IMPLICIT NONE
  FileName=''
  FileName='AdvecLinear1D_RA'
  CtrlWriteDataFile=.TRUE.
 END SUBROUTINE InitClass_WritetoGrads

 FUNCTION SchemeWriteData(irec)  RESULT (ok)
   IMPLICIT NONE
   INTEGER   , INTENT (INOUT) :: irec
   INTEGER                    :: ok
   INTEGER                    :: lrec
   REAL (KIND=r4)       :: Yout(iMax)
   INQUIRE (IOLENGTH=lrec) Yout

IF(CtrlWriteDataFile)OPEN(UnitData,FILE=TRIM(FileName)//'.bi
n',&
    FORM='UNFORMATTED', ACCESS='DIRECT',
STATUS='UNKNOWN', &
   ACTION='WRITE', RECL=lrec)
   CtrlWriteDataFile=.FALSE.
   Yout=REAL(PHI_C(1:iMax),KIND=r4)
   irec=irec+1
   WRITE(UnitData,rec=irec)Yout
   ok=0
 END FUNCTION SchemeWriteData
```

```
 FUNCTION SchemeWriteCtl(nrec)  RESULT (ok)
   IMPLICIT NONE
   INTEGER, INTENT (IN) :: nrec
   INTEGER                   :: ok

   OPEN(UnitCtl,FILE=TRIM(FileName)//'.ctl',FORM='FORMATTED',
&

ACCESS='SEQUENTIAL',STATUS='UNKNOWN',ACTION='WRITE')
   WRITE (UnitCtl,'(A6,A          )')'dset ^',TRIM(FileName)//'.bin'
   WRITE (UnitCtl,'(A              )')'title  EDO'
   WRITE (UnitCtl,'(A              )')'undef  -9999.9'
   WRITE (UnitCtl,'(A6,I8,A18   )')'xdef  ',iMax,' linear 0.00 0.001'
   WRITE (UnitCtl,'(A              )')'ydef  1 linear  -1.27 1'
   WRITE (UnitCtl,'(A6,I6,A25   )')'tdef  ',nrec,' linear  00z01jan0001
1hr'
   WRITE (UnitCtl,'(A20            )')'zdef  1 levels 1000 '
   WRITE (UnitCtl,'(A               )')'vars 1'
   WRITE (UnitCtl,'(A              )')'phic 0 99 resultado da edol yc'
   WRITE (UnitCtl,'(A              )')'endvars'
   CLOSE (UnitCtl, STATUS='KEEP')
   CLOSE (UnitData, STATUS='KEEP')
   ok=0
 END FUNCTION SchemeWriteCtl


END MODULE Class_WritetoGrads
```

```fortran
PROGRAM Main
 USE Class_Fields, Only :Init_Class_Fields
 USE Class_NumericalMethod, Only:
InitNumericalScheme, &

SchemeForward,SchemeUpdate,SchemeUpStream,Filter_
RA
 USE Class_WritetoGrads, Only :InitClass_WritetoGrads,
&
   SchemeWriteData,SchemeWriteCtl
 IMPLICIT NONE
 INTEGER                , PARAMETER  :: r8=8
 INTEGER                , PARAMETER  :: r4=4
 INTEGER                , PARAMETER :: xdim=1000
 REAL (KIND=r8)      , PARAMETER :: Uvel0=10.0!m/s
 REAL (KIND=r8)      , PARAMETER :: dt=0.08   !s
 REAL (KIND=r8)      , PARAMETER :: dx=1.0   !m
 INTEGER                , PARAMETER :: ninteraction=400
 REAL (KIND=r8)      , PARAMETER :: alfa=0.05

 CALL Init()
 CALL run()

CONTAINS

 SUBROUTINE Init()
   IMPLICIT NONE
   CALL Init_Class_Fields(xdim,Uvel0,alfa)
   CALL InitNumericalScheme(dt,dx)
   CALL InitClass_WritetoGrads
 END SUBROUTINE Init
```

```fortran
 SUBROUTINE Run()
   IMPLICIT NONE
   INTEGER :: test,it,irec
   irec=0
   DO it=1,ninteraction
     PRINT*,it
     test=SchemeUpStream()
     test=Filter_RA()
     test=SchemeWriteData(irec)
     test=SchemeUpdate()
   END DO
   test=SchemeWriteCtl(ninteraction)
 END SUBROUTINE Run

 SUBROUTINE Finalize()
   IMPLICIT NONE
 END SUBROUTINE Finalize
END PROGRAM Main
```

O RAW

```fortran
MODULE Class_Fields
  IMPLICIT NONE
  PRIVATE
  INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER  :: r8=8
  INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER  :: r4=4
  REAL (KIND=r8),PUBLIC ,ALLOCATABLE :: PHI_P(:)
  REAL (KIND=r8),PUBLIC ,ALLOCATABLE :: PHI_C(:)
  REAL (KIND=r8),PUBLIC ,ALLOCATABLE :: PHI_M(:)
  REAL (KIND=r8),PUBLIC ,ALLOCATABLE :: Deslc(:)
  REAL (KIND=r8),PUBLIC              :: Uvel
  INTEGER         ,PUBLIC            :: iMax
  REAL (KIND=r8),PUBLIC              :: alfa
  REAL (KIND=r8),PUBLIC              :: beta
  PUBLIC :: Init_Class_Fields

CONTAINS
!-------------------------------------------------------------------------------------------
  SUBROUTINE Init_Class_Fields(xdim,Uvel0,alfa_in,beta_in)
    IMPLICIT NONE
    INTEGER          , INTENT (IN   ) :: xdim
    REAL (KIND=r8), INTENT (IN   ):: Uvel0
    REAL (KIND=r8), INTENT (IN   ):: alfa_in
    REAL (KIND=r8), INTENT (IN   ):: beta_in
    iMax=xdim
    Uvel=Uvel0
    alfa=alfa_in
    beta=beta_in
    ALLOCATE (PHI_P(-1:iMax+2))
    ALLOCATE (PHI_C(-1:iMax+2))
    ALLOCATE (PHI_M(-1:iMax+2))
    ALLOCATE (Deslc(-1:iMax+2))
  END SUBROUTINE Init_Class_Fields
!-------------------------------------------------------------------------------------------
END MODULE Class_Fields
```

```fortran
MODULE Class_NumericalMethod
  USE Class_Fields, Only : PHI_P,PHI_C,PHI_M,Deslc,Uvel,iMax,alf
 IMPLICIT NONE
 PRIVATE
 INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER :: r8=8
 INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER :: r4=4
 REAL (KIND=r8) :: Dt
 REAL (KIND=r8) :: Dx

 PUBLIC :: InitNumericalScheme
 PUBLIC :: SchemeForward
 PUBLIC :: SchemeUpdate
 PUBLIC :: SchemeUpStream
 PUBLIC :: Filter_RAW
CONTAINS
!-------------------------------------------------------------------------------------------
 SUBROUTINE InitNumericalScheme(dt_in,dx_in)
   IMPLICIT NONE
   REAL (KIND=r8), INTENT (IN   ) :: dt_in
   REAL (KIND=r8), INTENT (IN   ) :: dx_in
   INTEGER :: i
   Dt=dt_in
   Dx=dx_in
   DO i=-1,iMax+2
      IF (i*dx < 400.0) THEN
         PHI_C(i)= 0.0
      ELSE IF ( i*dx >= 400.0 .AND. i*dx <= 500.0 ) THEN
         PHI_C(i)= 0.1*(i*dx -400.0)
      ELSE IF ( i*dx >= 500.0 .AND. i*dx <= 600.0 ) THEN
         PHI_C(i)= 20.0 - 0.1*(i*dx -400.0)
      ELSE IF ( i*dx > 600.0 ) THEN
         PHI_C(i)= 0.0
      END IF
   END DO
   PHI_M=PHI_C
   PHI_P=PHI_C
 END SUBROUTINE InitNumericalScheme
!-------------------------------------------------------------------------------------------
```

```
FUNCTION SchemeForward()  RESULT(ok)
  IMPLICIT NONE
  ! Utilizando a diferenciacao forward
  !
  ! F(j,n+1) - F(j,n)       F(j+1,n) - F(j,n)
  !------------------- + u ------------------- = 0
  !       dt                       dx
  !
  INTEGER :: ok
  INTEGER :: j
  DO j=1,iMax
    PHI_P(j) = PHI_C(j) - (Uvel*Dt/Dx)*(PHI_C(j+1)-PHI_C(j))
  END DO
  CALL UpdateBoundaryLayer()
END FUNCTION SchemeForward

!-----------------------------------------------------------------------------------------------
FUNCTION SchemeUpStream()  RESULT (ok)
  IMPLICIT NONE
  ! Utilizando a diferenciacao forward no tempo e
  ! backward no espaco (upstream)
  !
  ! F(j,n+1) - F(j,n)       F(j,n) - F(j-1,n)
  !------------------- + u ------------------- = 0
  !       dt                       dx
  !
  INTEGER :: ok
  INTEGER :: j
  DO j=1,iMax
    PHI_P(j) = PHI_C(j) - (Uvel*Dt/Dx)*(PHI_C(j)-PHI_C(j-1))
  END DO
  CALL UpdateBoundaryLayer()
END FUNCTION SchemeUpStream
```

```
FUNCTION Filter_RAW()  RESULT (ok)
  IMPLICIT NONE
  INTEGER :: i
  INTEGER :: ok
  DO i=-1,iMax+2
    Deslc(i) = alfa*(PHI_M(i) - 2.0*PHI_C(i) + PHI_P(i) )
    PHI_C(i) = PHI_C(i) + Deslc(i)
    PHI_P(i) = PHI_P(i) + Deslc(i)*(beta-1.0)

  END DO
  ok=0
END FUNCTION Filter_RAW

!-----------------------------------------------------------------------------------------------
SUBROUTINE UpdateBoundaryLayer()
  IMPLICIT NONE
  PHI_P(0)      =  PHI_P(iMax )
  PHI_P(-1)     =  PHI_P(iMax-1)
  PHI_P(imax+1) =  PHI_P(1)
  PHI_P(iMax+2) =  PHI_P(2)
END  SUBROUTINE UpdateBoundaryLayer
!-----------------------------------------------------------------------------------------------
FUNCTION SchemeUpdate()  RESULT (ok)
  IMPLICIT NONE
  INTEGER :: ok
  PHI_M=PHI_C
  PHI_C=PHI_P
  ok=0
END FUNCTION SchemeUpdate
!-----------------------------------------------------------------------------------------------
END MODULE Class_NumericalMethod
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
MODULE Class_WritetoGrads
 USE Class_Fields, Only: PHI_P,PHI_C,PHI_M,Uvel,iMax
 IMPLICIT NONE
 PRIVATE
  INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER  :: r8=8
  INTEGER, PUBLIC      , PARAMETER  :: r4=4
  INTEGER                  , PARAMETER :: UnitData=1
  INTEGER                  , PARAMETER :: UnitCtl=2
  CHARACTER (LEN=400)             :: FileName
  LOGICAL                          :: CtrlWriteDataFile
  PUBLIC :: SchemeWriteCtl
  PUBLIC :: SchemeWriteData
  PUBLIC :: InitClass_WritetoGrads
CONTAINS
 SUBROUTINE InitClass_WritetoGrads()
   IMPLICIT NONE
   FileName=''
   FileName='AdvecLinear1D_RAW'
   CtrlWriteDataFile=.TRUE.
 END SUBROUTINE InitClass_WritetoGrads

 FUNCTION SchemeWriteData(irec)  RESULT (ok)
   IMPLICIT NONE
   INTEGER   , INTENT (INOUT) :: irec
   INTEGER                    :: ok
   INTEGER                    :: lrec
   REAL (KIND=r4)        :: Yout(iMax)
   INQUIRE (IOLENGTH=lrec) Yout

IF(CtrlWriteDataFile)OPEN(UnitData,FILE=TRIM(FileName)//'.bi
n',&
    FORM='UNFORMATTED', ACCESS='DIRECT',
STATUS='UNKNOWN', &
   ACTION='WRITE', RECL=lrec)
   CtrlWriteDataFile=.FALSE.
   Yout=REAL(PHI_C(1:iMax),KIND=r4)
   irec=irec+1
   WRITE(UnitData,rec=irec)Yout
   ok=0
 END FUNCTION SchemeWriteData
```

```
 FUNCTION SchemeWriteCtl(nrec)  RESULT (ok)
   IMPLICIT NONE
   INTEGER, INTENT (IN) :: nrec
   INTEGER                    :: ok

   OPEN(UnitCtl,FILE=TRIM(FileName)//'.ctl',FORM='FORMATTED',
&

ACCESS='SEQUENTIAL',STATUS='UNKNOWN',ACTION='WRITE')
   WRITE (UnitCtl,'(A6,A          )')'dset ^',TRIM(FileName)//'.bin'
   WRITE (UnitCtl,'(A               )')'title  EDO'
   WRITE (UnitCtl,'(A               )')'undef  -9999.9'
   WRITE (UnitCtl,'(A6,I8,A18   )')'xdef  ',iMax,' linear 0.00 0.001'
   WRITE (UnitCtl,'(A               )')'ydef  1 linear  -1.27 1'
   WRITE (UnitCtl,'(A6,I6,A25   )')'tdef  ',nrec,' linear  00z01jan0001
1hr'
   WRITE (UnitCtl,'(A20            )')'zdef  1 levels 1000 '
   WRITE (UnitCtl,'(A                )')'vars 1'
   WRITE (UnitCtl,'(A               )')'phic 0 99 resultado da edol yc'
   WRITE (UnitCtl,'(A               )')'endvars'
   CLOSE (UnitCtl, STATUS='KEEP')
   CLOSE (UnitData, STATUS='KEEP')
   ok=0
 END FUNCTION SchemeWriteCtl


END MODULE Class_WritetoGrads
```

```
PROGRAM Main
 USE Class_Fields, Only :Init_Class_Fields
 USE Class_NumericalMethod, Only:
InitNumericalScheme, &

SchemeForward,SchemeUpdate,SchemeUpStream,Filter_
RAW
 USE Class_WritetoGrads, Only :InitClass_WritetoGrads,
&
   SchemeWriteData,SchemeWriteCtl
 IMPLICIT NONE
 INTEGER                  , PARAMETER  :: r8=8
 INTEGER                  , PARAMETER  :: r4=4
 INTEGER                  , PARAMETER :: xdim=1000
 REAL (KIND=r8)      , PARAMETER :: Uvel0=10.0   !m/s
 REAL (KIND=r8)      , PARAMETER :: dt=0.08         !s
 REAL (KIND=r8)      , PARAMETER :: dx=1.0   !m
 INTEGER                  , PARAMETER :: ninteraction=400
 REAL (KIND=r8)      , PARAMETER :: alfa=0.05
 REAL (KIND=r8)      , PARAMETER :: beta=0.05    !0.5 <
beta <= 1

 CALL Init()
 CALL run()

CONTAINS

 SUBROUTINE Init()
  IMPLICIT NONE
  CALL Init_Class_Fields(xdim,Uvel0,alfa,beta)
  CALL InitNumericalScheme(dt,dx)
  CALL InitClass_WritetoGrads
 END SUBROUTINE Init
```

```
 SUBROUTINE Run()
  IMPLICIT NONE
  INTEGER :: test,it,irec
  irec=0
  DO it=1,ninteraction
    PRINT*,it
    test=SchemeUpStream()
    test=Filter_RAW()
    test=SchemeWriteData(irec)
    test=SchemeUpdate()
  END DO
  test=SchemeWriteCtl(ninteraction)
 END SUBROUTINE Run

 SUBROUTINE Finalize()
  IMPLICIT NONE

 END SUBROUTINE Finalize

END PROGRAM Main
```