Aplanado eficiente de grandes modelos Modelica

Mariano Botta

FCEIA, UNR

Agosto 2015

Contenido de la charla

Motivaciones

- Modelado, Simulación y Control en Tiempo Real con Aplicaciones en Electrónica de Potencia.
- Trabajar con sistemas a grandes escalas.
- Simulación en paralelo utilizando los métodos de cuantificación de estado.
- Aprovechar las ventajas de Modelica para describir modelos grandes.

Objetivos

- Mantener las caracteristicas de Modelica en las sucesivas etapas de compilación.
- Especificamente, en la etapa de Aplanado.
- Mantener definiciones de arreglos y ecuaciones *for* en:
  1. Reducción de clases.
  2. Resolución de conexiones.

Contenido de la charla

Modelica

- Lenguaje de modelado orientado a objetos.
- Modelado de sistemas complejos, con componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos, hidráulicos, térmicos, etc.
- Desarrollado por la asociación sin fines de lucro “Modelica Asociation”.
- Los modelo son descriptos en texto plano.
- Entornos de desarrollo: OpenModelica, MathModelica, Dymola, etc.
- Librería con componentes ya definidos.

Clases

- Define un objeto.
- Son instanciadas mediante la definición de variables.
- Tienen tres secciones:
  1. Definiciones.
  2. Ecuaciones.
  3. Sentencias.
- Clases especializadas: *model*, *record*, *block*, *connector*, *function*, *package*

```
class X
    // Definiciones de
            variables y clases
equation
    // Ecuaciones
statements
    // Sentencias
end X;
```

Herencias de Clases

- Agrega significado semántico al modelo.
- Facilita la reutilización de código.
- Se utiliza la palabra reservada: *extends*.

La clase hijo obtiene las caracteristicas del padre.

```
model OnePort
    Pin p;
    Pin n;
    Real v;
    Real i;
equation
    v = p.v - n.v;
    i = p.i;
    i = -n.i;
end OnePort;
model Capacitor
    extends OnePort;
    parameter Real C = 1;
equation
    C * der(v) = i;
end Capacitor;
```

Tipos de Variables

- **Tipos básicos**: *Real*, *Integer*, *Boolean* y *String*
- Las clases definen un nuevo tipo.
- **Sinónimos de tipos**:
  type Nombre = [Prefijos] Tipo-Existente [Array] [Modificaciones]
- **Prefijos de Tipo**: *flow*, *constant*, *parameter*, *discrete*, *input* y *output*.

```
package Circuits
    type Current = flow Real;
    type Voltage = Real;
    connector Pin
        Voltage v;
        Current i;
    end Pin;
    type TenPin = Pin[10];
end Circuits;
```

Definiciones de variables

1. **Prefijos de tipos**: *flow*, *constant*, *parameter*, *discrete*, *input* y *output*.
2. **Tipo**: Nombre del tipo de la variable. Puede ser un tipo básico, una clase o un sinónimo de tipo. Ejemplo: *Real*, *String*, *Pin*, *TenPin*.
3. **Nombre de la variable**.
4. **Dimensión**: Modelica permite la definición de arreglos.
5. **Modificaciones**.

```
type TenPin = Pin[10];

TenPin pines;
Pin pines2 [10];
```

Modificaciones

Aparecen en

1. Declaraciones de variables.
2. Sinónimo de tipo.
3. Definiciones de herencia.

Podemos

1. Cambiar el valor inicial de una variable.
2. Redefinir una variable.
3. Cambiar la definición de un tipo.
4. Anidar modificaciones.

```
package Circuits
    model CircuitX
        Capacitor cap;
        Resistor res;
        ...
    equation

    ...

    end CircuitX;
    model MainCircuit
        Capacitor x(C = 2);
        CircuitX co1 (cap(C = 10));
        CircuitX co2 (cap(C = 15));
    end MainCircuit;
end Circuits;
```

Ecuaciones

Las ecuaciones no representan una asignación, sino igualdades.
Pueden tener expresiones complejas de ambos lados de la igualdad y expresan una relación entre las variables.

Ecuaciones de Igualdad

```
p.v - n.v = v;
i = p.i;
i = -n.i;
```

Ecuación *for*

```
for i in 1:N loop
    v[i] = p[i].v - n[i].v;
    i[i] = p[i].i;
    i[i] = -n[i].i;
    C[i] * der(v[i]) = i;
end for;
```

N = 4

```
v[1] = p[1].v - n[1].v;
v[2] = p[2].v - n[2].v;
v[3] = p[3].v - n[3].v;
v[4] = p[4].v - n[4].v;
```

Ecuaciones *connect*

Conectores

- Son clases con ciertas restricciones.
- Se definen con el prefijo *connector*.
- No tienen ecuaciones.
- Tienen variables de dos tipos:
  - Variables de potencial. Ejemplo: presión, voltaje, etc.
  - Variables de flujo: definidas con el prefijo flow. Ejemplo: corriente, caudal, etc.

Ejemplo

Clase Pin:

- Voltaje: Variables de potencial.
- Corriente: Variables de flujo.

Ecuaciones *connect*

Ecuaciones *connect*

- Conectan dos clases del mismo tipo.
- Genera relaciones entre las variables internas de los conectores:
  - Las variables de potencial dentro de una misma conexión deben ser iguales entre sí.
  - Las variables de flujo siguen las reglas de Kirchhoff: la suma de los flujos es igual a cero.

```
model LC_circuit
    Capacitor cap(v(start = 1));
    inductor ind(L = 2);
    ground gr;
equation
    connect(ind.p,cap.p);
    connect(ind.n,cap.n);
    connect(cap.n,gr.p);
end LC_circuit;
```

```
// Variables de Potencial
ind.n.v  = cap.n.v;
cap.n.v = gr.p.v;

// Variables de flujo
ind.n.i + cap.n.i + gr.p.i = 0;
```

Tamaños de un modelo

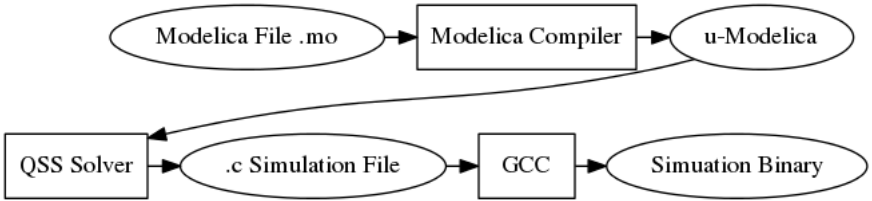
Tamaño de la descripción

Consideramos la cantidad de clases, variables, ecuaciones, etc. usadas.

Tamaño del sistema

Consideramos la dimensionalidad del modelo.
Cantidad total de variables.

Simulación de Modelos Modelica



Simulación de Modelos Grandes

Problemas

Expandir las variables y ecuaciones vectorizadas provoca una perdida de eficiencia en las etapas de compilación.
Imposibilidad de trabajar con sistemas de gran tamaño.

Objetivos

Algoritmo de aplanado con costo computacional constante con respecto a la dimensionalidad del modelo.
Mantener las definiciones de arreglos y ecuaciones *for* durante toda la etapa de compilación.

Contenido de la charla

Modelo aplanado

Modelo aplanado

1. Modelo monolítico.
2. Carencias de clases.
3. Variables de tipo básicos.
4. No posee ecuaciones *connect*.

Algoritmo de aplanado

Esta dividido en dos etapas:

Reducción de composiciones

1. Expansión de herencia.
2. Simplificación de tipos.
3. Aplicación de modificaciones.
4. Reducción de instancias.

Resolución de conexiones

Descomposición de ecuaciones *connect* en ecuaciones simples.

Algoritmo de aplanado

Reducción de composiciones

Algoritmo de Aplanado - Reducción de composiciones

```
Flat(C):
    Expand(C);
    foreach v in Variables(C):
        t = ResolveType(v);
        if isBasic(t) then
            ChangeType(v,t);
        else if isClass(t) AND NOT isConnector(t) then
            ApplyModification(C,t,Modification(v));
            Flat(t);
            RemoveComposition(C,t);
            if isConnector(t) then
                ChangeType(v,t);
            else
                Remove(t);
            end if;
        end if;
    end foreach;
    foreach e in Equations(C):
        ChangeVarName(e);
```

Expansión de herencias de clases

La clase hijo hereda las variables y ecuaciones del padre.

Expansión de herencias de clases

La clase hijo hereda las variables y ecuaciones del padre.

```
model OnePort
    Pin p;
    Pin n;
    Real v;
    Real i;
equation
    v = p.v - n.v;
    i = p.i;
    i = -n.i;
end OnePort;
model Capacitor
    extends OnePort;
    parameter Real C = 1;
equation
    C * der(v) = i;
end Capacitor;
```

Expansión de herencias de clases

La clase hijo hereda las variables y ecuaciones del padre.

```
model OnePort
    Pin p;
    Pin n;
    Real v;
    Real i;
equation
    v = p.v - n.v;
    i = p.i;
    i = -n.i;
end OnePort;
model Capacitor
    extends OnePort;
    parameter Real C = 1;
equation
    C * der(v) = i;
end Capacitor;
```

```
model Capacitor
    Pin p;2
    Pin n;
    Real v;
    Real i;2
    parameter Real C = 1;
equation
    v = p.v - n.v;
    i = p.i;
    i = -n.i;
    C * der(v) = i;
end Capacitor;
```

Simplificación de tipos - ResolveType

Determina el tipo real de una variable y sus características:

- Prefijos de Tipos.
- Definición de Arreglos.
- Presencia de modificaciones.

Simplificación de tipos - ResolveType

Determina el tipo real de una variable y sus características:

- Prefijos de Tipos.
- Definición de Arreglos.
- Presencia de modificaciones.

```
package Circuits
    model Capacitor
        extends OnePort;
        parameter Real C ← 1;
    equation
        C * der(v) ← i;
    end Capacitor;

    model LC_circuit ←
        Capacitor cap(v(start ← 1));
        inductor ind(L ← 2);
        Pin p1,p2,p3;
    equation
```

Simplificación de tipos - ResolveType

Determina el tipo real de una variable y sus características:

- Prefijos de Tipos.
- Definición de Arreglos.
- Presencia de modificaciones.

```
package Circuits ←
    model Capacitor
        extends OnePort;
        parameter Real C ← 1;
    equation
        C * der(v) ← i;
    end Capacitor;

    model LC_circuit
        Capacitor cap(v(start ← 1));
        inductor ind(L ← 2);
        Pin p1,p2,p3;
    equation
```

Simplificación de tipos - ResolveType

Determina el tipo real de una variable y sus características:

- Prefijos de Tipos.
- Definición de Arreglos.
- Presencia de modificaciones.

```
package Circuits ←
    model Capacitor
        extends OnePort;
        parameter Real C ← 1;
    equation
        C * der(v) ← i;
    end Capacitor;

    model LC_circuit
        Capacitor cap(v(start ← 1));
        inductor ind(L ← 2);
        Pin p1,p2,p3;
    equation
```

Aplicación de modificaciones - ApplyModification

1. Expandir la clase.
2. Agregar las modificaciones a la variable correspondiente.

Aplicación de modificaciones - ApplyModification

1. Expandir la clase.
2. Agregar las modificaciones a la variable correspondiente.

Capacitor c (C=5,v(start=2))

Aplicación de modificaciones - ApplyModification

1. Expandir la clase.
2. Agregar las modificaciones a la variable correspondiente.

Capacitor c (C=5,v(start=2))

```
model Capacitor
    Pin p;
    Pin n;
    Real v;
    Real i;
    parameter Real C = 1;
equation
    v = p.v - n.v;
    i = p.i;
    i = -n.i;
    C * der(v) = i;
end Capacitor;
```

```
model Capacitor
    Pin p;
    Pin n;
    Real v (start=2);
    Real i;
    parameter Real C = 5;
equation
    v = p.v - n.v;
    i = p.i;
    i = -n.i;
    C * der(v) = i;
end Capacitor;
```

Reducción de instancias - RemoveComposition

RemoveComposition

1. Reemplaza las instancias de clases (previamente aplanada).
2. Añade las variables y ecuaciones internas.
3. Renombrar las variables añadidas.
4. Si la instancia está vectorizada:
    1. Agrega las variables vectorizadas.
    2. Encapsulamos las ecuaciones dentro de una ecuación *for*.

RemoveComposition

Variables

1. Agrega un prefijo al nombre de las variables: "nombreInstancia_".
2. Mantiene los prefijos de tipos de las variable.
3. Mantiene las definiciones de arreglos y agrega nuevas si la instancia lo está.

Ecuaciones

1. Renombra las variables que correspondan.
2. Reemplaza el operador "." por guiónes.
3. Encapsula las ecuaciones en un *for* si la instancia esta vectorizada.

Algoritmo de Aplanado - Reducción de composiciones

```
Flat(C):
    Expand(C);
    foreach v in Variables(C):
        t = ResolveType(v);
        if isBasic(t) then
            ChangeType(v,t);
        else if isClass(t) AND NOT isConnector(t) then
            ApplyModification(C,t,Modification(v));
            Flat(t);
            RemoveComposition(C,t);
            if isConnector(t) then
                ChangeType(v,t);
            else
                Remove(t);
            end if;
        end if;
    end foreach;
    foreach e in Equations(C):
        ChangeVarName(e);
```

RemoveComposition: Ejemplos

```
package Circuits
    model LC_circuit
        Pin p1,p2,p3;
    equation
        p1.v = p2.v;
        p2.v = p3.v;
    end LC_circuit;

    model LC_line
        constant Integer N = 10;
        LC_circuit lc[N];
        ground gr;
    equation
        connect(lc[N].p1,lc[N].p2)
        for i in 1:N - 1 loop
            connect(lc[i + 1].p3,lc[i].p2);
        end for;
        for i in 1:N loop
            connect(gr.p,lc[i].p1);
        end for;
    end LC_line;
```

```
package Circuits
    model LC_circuit
        Pin p1,p2,p3;
        flow Real p1_i,p2_i,p3_i;
        Real p1_v,p2_v,p3_v;
    equation
        p1_v = p2_v;
        p2_v = p3_v;
    end LC_circuit;
end Circuits;
```

RemoveComposition: Ejemplos

```
model LC_circuit
    Pin p1,p2,p3;
    flow Real p1_i,p2_i,p3_i;
    Real p1_v,p2_v,p3_v;
equation
    p1_v = p2_v;
    p2_v = p3_v;
end LC_circuit;

model LC_line
    constant Integer N = 10;
    LC_circuit lc[N];
    ground gr;
equation
    connect(lc[N].p1,lc[N].p2)
    for i in 1:N - 1 loop
        connect(lc[i + 1].p3,lc[i].p2);
    end for;
    for i in 1:N loop
        connect(gr.p,lc[i].p1);
    end for;
```

```
package Circuits
    model LC_line
        constant Integer N = 10;
        Pin p1[N],p2[N],p3[N];
        flow Real lc_p1_i[N],lc_p2_i[N],lc_p3_i[N];
        Real lc_p1_v[N],lc_p2_v[N],lc_p3_v[N];
        ground gr;
    equation
        for i in 1:N - 1 loop
            p1_v[N] = p2_v[N];
            p2_v[N] = p3_v[N];
        end for;
        connect(lc_p1[N],lc_p2[N])
        for i in 1:N - 1 loop
            connect(lc_p3[i + 1],lc_p2[i]);
        end for;
        for i in 1:N loop
            connect(gr_p,lc_p1[i]);
        end for;
    end LC_line;
end Circuits;
```

Algoritmo de aplanado

Resolución de conexiones

Resolución de conexiones

Resolución de conexiones

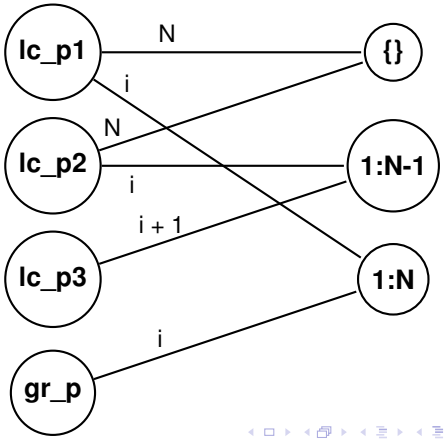
1. Generación de un grafo bipartito a partir de las ecuaciones *connects*.
2. Determinación de componente conexas del grafo generado.
3. Generación de ecuaciones a partir de las componentes conexas.

Grafo bipartito

1. Agregamos un nodo por cada variable de la ecuación.
2. Agregamos un nodo que representa a la ecuación *connect*.
3. Si la ecuación estaba dentro de un *for*, etiquetamos el nodo *connect* con el rango de iteración.
4. Agregamos dos aristas, entre cada variable y el nodo que representa al *connect*.
5. Por cada arista, si la variable asociada tiene un índice de acceso, agregamos esa referencia a la arista.

Grafo Bipartito: Ejemplo

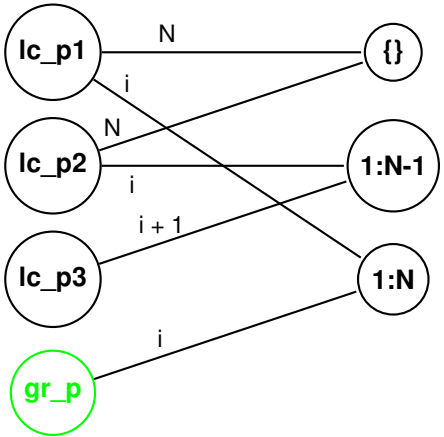
```
connect(lc_p1[N],lc_p2[N])

for i in 1:N - 1 loop
    connect(lc_p3[i + 1],lc_p2[i]);
end for;

for i in 1:N loop
    connect(gr_p[i],lc_p1[i]);
end for;
```



Determinación de componentes conexas

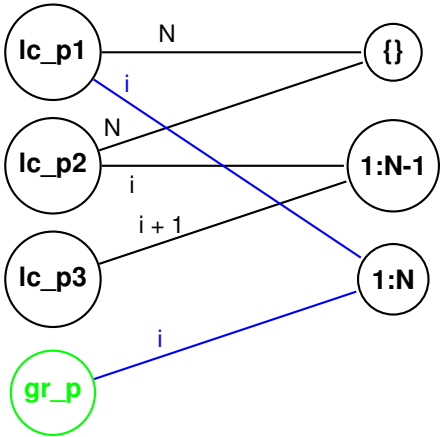
- Busqueda en profundida sobre el grafo.
- Cada visita a un nodo depende de la metadata del grafo.
- Multiples visitas a un mismo nodo.
- Mantenemos referencia del intervalo de acceso al nodo.
- Visitamos un nodo si hay intersección entre intervalos.
- Podamos parte de la arista al visitar un nodo.
- Terminamos cuando no hay más intersección con otros nodos.

Determinación de componentes conexas



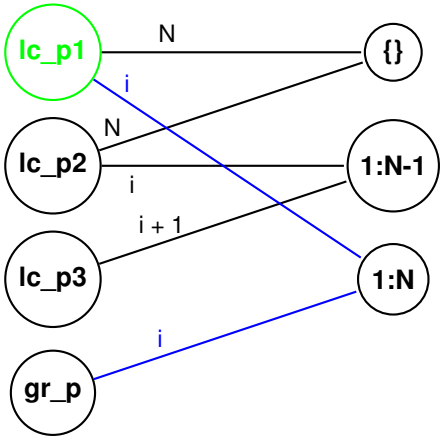
1. Arrancamos en *gr_p*.

Determinación de componentes conexas



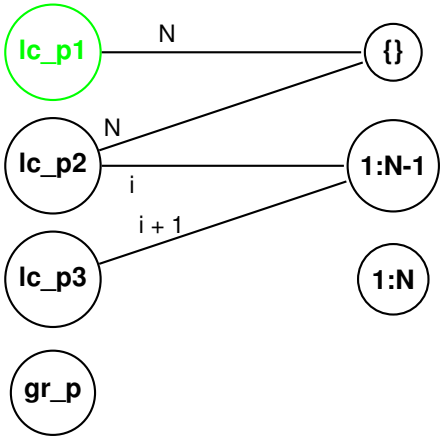
1. Arrancamos en *gr_p*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N.

Determinación de componentes conexas



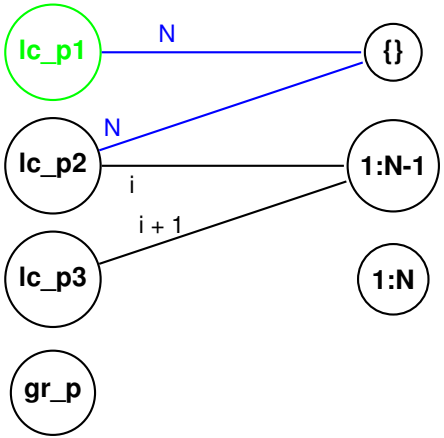
1. Arrancamos en *gr_p*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N.
3. Visitamos *lc_p1* con intervalo 1:N.

Determinación de componentes conexas



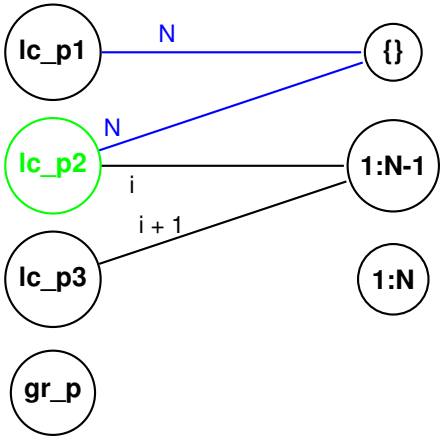
1. Arrancamos en *gr_p*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N.
3. Visitamos *lc_p1* con intervalo 1:N.
4. Podamos el grafo.

Determinación de componentes conexas



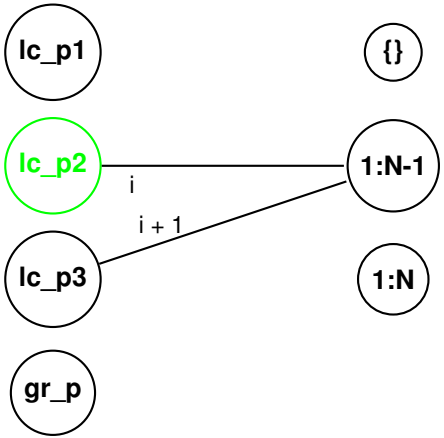
1. Arrancamos en *gr_p*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N.
3. Visitamos *lc_p1* con intervalo 1:N.
4. Podamos el grafo.
5. Existe único camino con intervalo N.

Determinación de componentes conexas



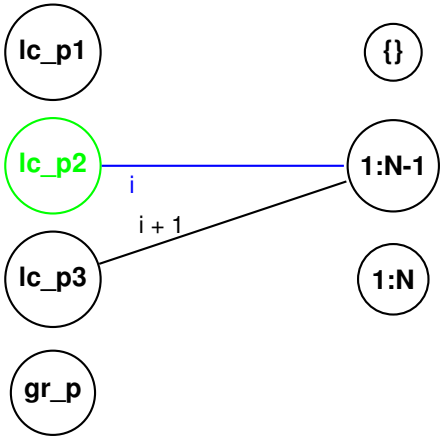
1. Arrancamos en *gr_p*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N.
3. Visitamos *lc_p1* con intervalo 1:N.
4. Podamos el grafo.
5. Existe único camino con intervalo N.
6. Visitamos *lc_p2* con intervalo N.

Determinación de componentes conexas



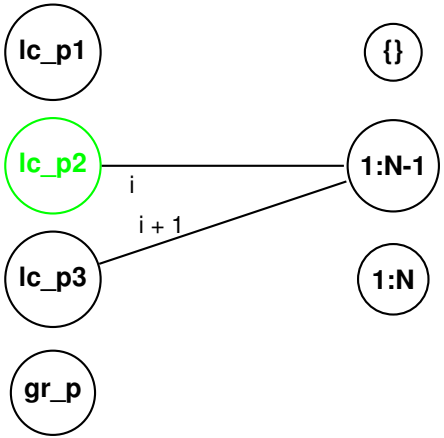
1. Arrancamos en *gr_p*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N.
3. Visitamos *lc_p1* con intervalo 1:N.
4. Podamos el grafo.
5. Existe único camino con intervalo N.
6. Visitamos *lc_p2* con intervalo N.
7. Podamos el grafo.

Determinación de componentes conexas



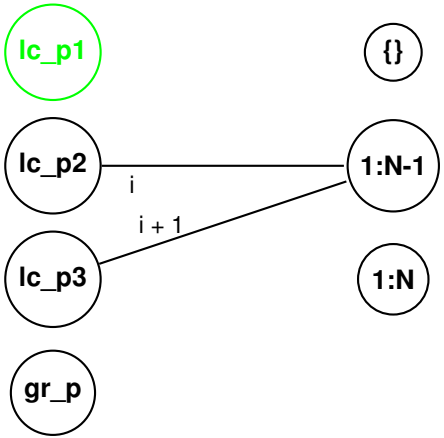
1. Arrancamos en *gr_p*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N.
3. Visitamos *lc_p1* con intervalo 1:N.
4. Podamos el grafo.
5. Existe único camino con intervalo N.
6. Visitamos *lc_p2* con intervalo N.
7. Podamos el grafo.
8. $N \cap 1 : N - 1 = \{\}$.
   No hay más nodos para buscar.

Determinación de componentes conexas



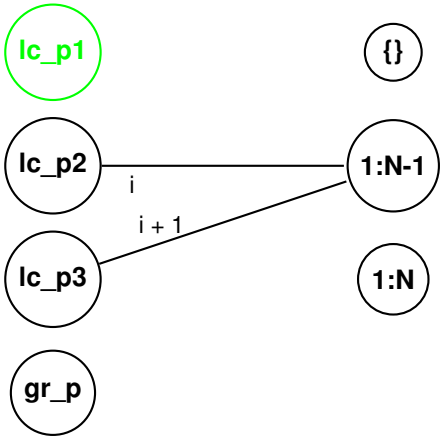
1. En *lc_p2* la solución es:
   - $\langle lc\_p2 \rangle$ en N.

Determinación de componentes conexas



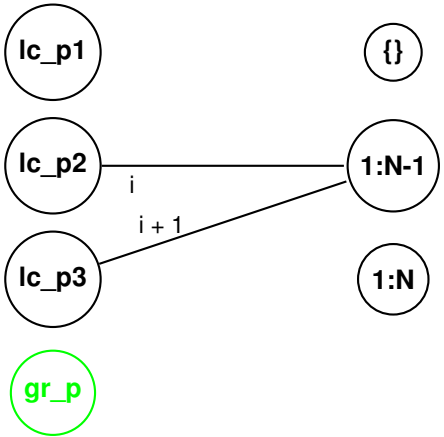
1. En *lc_p2* la solución es:
   - $\langle lc\_p2 \rangle$ en N.
2. En *lc_p1* hubo una partición de intervalos:
   - $1 : N - 1$
   - N

Determinación de componentes conexas



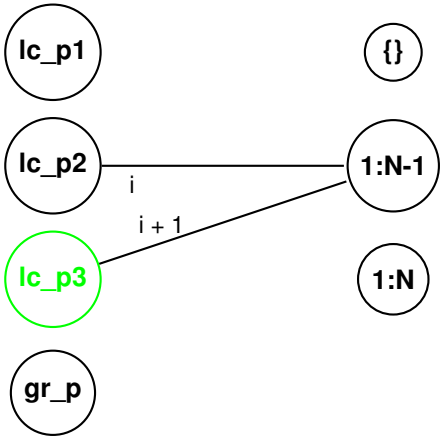
1. En *lc_p2* la solución es:
   - $\langle lc\_p2 \rangle$ en N.
2. En *lc_p1* hubo una partición de intervalos:
   - $1 : N - 1 \rightarrow \langle lc\_p1 \rangle$ en $1 : N - 1$
   - $N \rightarrow \langle lc\_p1, lc\_p2 \rangle$ en N

Determinación de componentes conexas



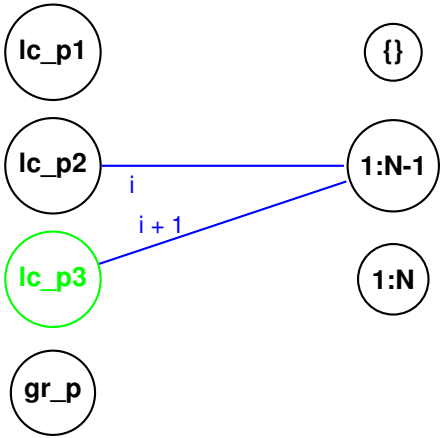
1. En *lc_p2* la solución es:
   - $\langle lc\_p2 \rangle$ en N.
2. En *lc_p1* hubo una partición de intervalos:
   - $1 : N - 1 \rightarrow \langle lc\_p1 \rangle$ en $1 : N - 1$
   - $N \rightarrow \langle lc\_p1, lc\_p2 \rangle$ en N
3. En *gr_p* las soluciones finales son:
   - $\langle gr\_p, lc\_p1 \rangle$ en $1 : N - 1$
   - $\langle gr\_p, lc\_p1, lc\_p2 \rangle$ en N

Determinación de componentes conexas



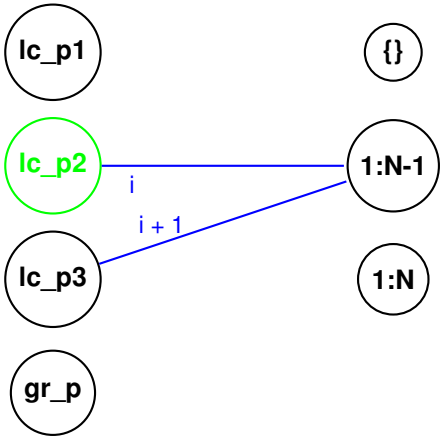
1. Arrancamos en *lc_p3*.

Determinación de componentes conexas



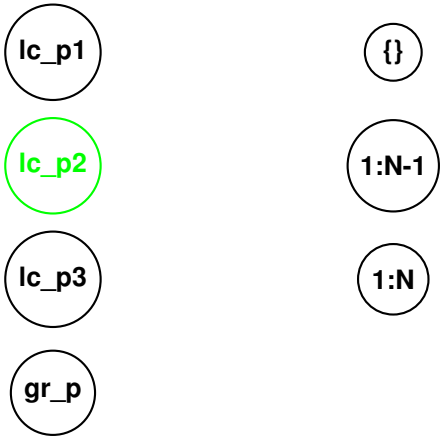
1. Arrancamos en *lc_p3*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N-1.

Determinación de componentes conexas



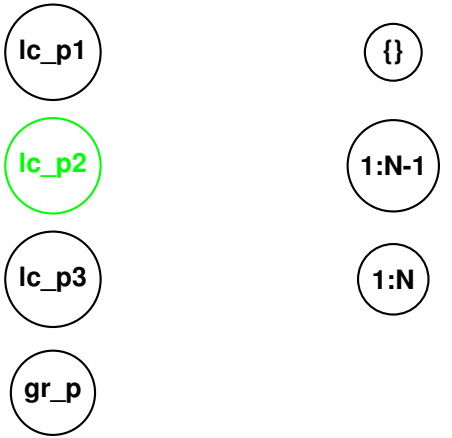
1. Arrancamos en *lc_p3*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N-1.
3. Visitamos *lc_p2* con intervalo 1:N-1.

Determinación de componentes conexas



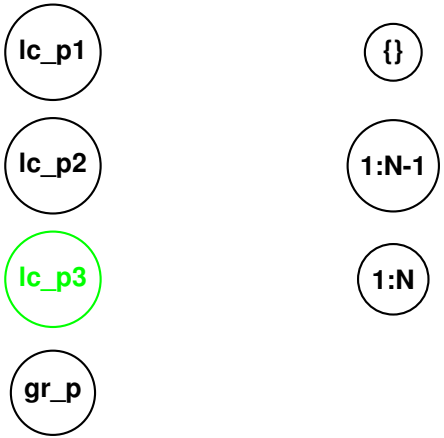
1. Arrancamos en *lc_p3*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N-1.
3. Visitamos *lc_p2* con intervalo 1:N-1.
4. Podamos el grafo.

Determinación de componentes conexas



1. Arrancamos en *lc_p3*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N-1.
3. Visitamos *lc_p2* con intervalo 1:N-1.
4. Podamos el grafo.
5. En *lc_p2* la solución es:
   - $\langle$*lc_p2[i]*$\rangle$ en 1:N-1.

Determinación de componentes conexas



1. Arrancamos en *lc_p3*.
2. Existe único camino con intervalo 1:N-1.
3. Visitamos *lc_p2* con intervalo 1:N-1.
4. Podamos el grafo.
5. En *lc_p2* la solución es:
   - $\langle lc\_p2[i] \rangle$ en 1:N-1.
6. En *lc_p3* la solución es:
   - $\langle lc\_p2[i], lc\_p3[i+1] \rangle$ en 1:N-1.

Generación de ecuaciones

- Cada componente conexa determina un conjunto de ecuaciones.
- Determinar el tipo de conector usado.
- Las variables de potencial deben quedar igualadas entre sí.
- Las variables de flujo deben sumar zero.

Generación de ecuaciones

- $\langle lc\_p2[i], lc\_p3[i+1] \rangle$ en 1:N-1.

```
for i in 1:N - 1 loop
    lc_p2_v[i] = lc_p3_v[i + 1];
    lc_p2_i[i] + lc_p3_i[i + 1] = 0;
end for;
```

- $\langle gr\_p, lc\_p1 \rangle$ en $1 : N - 1$.

```
for i in 1:N - 1 loop
    gr_p_v[i] = lc_p1_v[i];
    gr_p_i[i] + lc_p1_i[i] = 0;
end for;
```

- $\langle gr\_p, lc\_p1, lc\_p2 \rangle$ en N.

```
gr_p_v[N] = lc_p1_v[N];
gr_p_v[N] = lc_p2_v[N];
gr_p_i[N] + lc_p2_i[N] + lc_p2_i[N] = 0;
```

Contenido de la charla

Implementación y Comparaciones

1. Implementados en C++.
2. Pertenece al proyecto ModelicaCC [a], que contiene diversas herramientas para compilar los modelos y simularlos.
3. Realizamos pruebas de performance en varios ejemplos variando el parametro N.

[a] http://sourceforge.net/projects/modelicacc/

Comparaciones con otros algoritmos

N	OpenModelica		ModelicaCC	
	Tiempo(seg)	Tamaño(bytes)	Tiempo(seg)	Tamaño(bytes)
10	3.792	33.212	0.048	3.708
100	5.632	302.374	0.052	3.723
500	19.440	818.439	0.044	3.725
1000	51.628	3.048.164	0.052	3.738
3000	393.452	9.272.336	0.044	3.740
5000	1107.732	15.496.336	0.052	3.740
10000	Error	Error	0.058	3.753

Cuadro : Tiempos de aplanado variando *N* para el modelo LC_line

Contenido de la charla

Conclusiones

- Desarrollamos un algoritmo de aplanado que preserva la vectorización del modelo.
- Dentro de este algorimo, desarrollamos un métodos para encontrar las componente conexas dentro de un grafo bipartito vectorizado que luego aplicamos para calcular las conexiones del modelo sin necesidad de expandir el grafo.
- Implementamos ambos algoritmos en C++ dentro de la herramienta ModelicaCC.
- Realizamos pruebas tanto de ejemplos simples como de ejemplos vectoriales concluyendo que las transformaciones aplicadas por la herramienta desarrollada llegaban al resultado correcto.
- Comparamos nuestra implementación del algoritmo de aplanado con la de la herramienta OpenModelica para distintos tamaños de modelos vectorizados.

Trabajo a Futuro

- Adaptar el algorimo de resolución de ecuaciones *connect* para resolver anidaciones de dos o más ecuaciones *for*.
- Sugerimos como trabajo futuro, una herramienta capaz de cargar dinámicamente los componentes necesarios de la librería *Modelica* y así independizarnos de OpenModelica.
- Aplicar un caché de modelos aplanados con el objetivo de reducir a uno la cantidad de veces que aplanamos una misma clase.
- Estudiar la posibilidad de paralelizar el aplanado de clases.