



Universidad de Oviedo

Memoria del Trabajo Fin de Máster realizado por

**Sonia Madero García**

para la obtención del título de

Máster en Ingeniería de Automatización e Informática Industrial

**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN SOFTWARE  
PARA EL SEGUIMIENTO Y ESTIMACIÓN DE LA  
TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO DE  
PALANQUILLAS DE ACERO INOXIDABLE EN UN  
HORNO**

FEBRERO 2016

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	4
1.2 VISIÓN GENERAL DEL DOCUMENTO .....	4
1.3 DOCUMENTOS REFERENCIADOS .....	4
1.3 VISIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....	5
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA .....</b>	<b>6</b>
2.1 ROLDÁN, S.A .....	6
2.1.1 Acería.....	6
2.1.2 Laminación.....	7
2.1.3 Talleres de acabado.....	8
2.2 SISTEMA INFORMÁTICO DE ROLDÁN, S.A.....	9
2.2.1 Arquitectura general .....	9
2.2.2 Descripción general Nivel 2 .....	9
2.2.3 Arquitectura informática y de control de Laminación .....	10
<b>3. OBJETO.....</b>	<b>13</b>
<b>4. DISEÑO Y DESARROLLO .....</b>	<b>13</b>
4.1 TRAZABILIDAD DE LAS PALANQUILLAS EN EL HORNO .....	14
4.2 MODELO DE CALENTAMIENTO .....	15
4.2.1 El horno.....	15
4.2.2 Transferencia de calor.....	16
4.3 MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN EN UNA PALANQUILLA POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	20
4.3.1 Ecuaciones generales .....	20
4.3.2 Discretización en el espacio por el método Galerkin.....	22
4.3.3 Elemento rectangular .....	25
4.3.4 Obtención de los componentes de las matrices que rigen la evolución dinámica para un elemento rectangular .....	26
4.3.5 Ensamblado de elementos .....	31
4.3.6 Discretización en el tiempo .....	32
4.4 MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN EN EL HORNO .33	
4.4.1 Introducción .....	33
4.4.2. Modelo térmico de transferencia de calor en el horno.....	42

---

4.5 OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL GAS A PARTIR DEL TERMOPAR.....	45
4.6 GENERACIÓN DE HISTÓRICOS .....	46
4.7 MANUAL DEL PROGRAMADOR.....	47
4.7.1 Identificación del proyecto.....	47
4.7.3 Principales algoritmos de implementación .....	47
4.7.4 Organización del programa de control.....	49
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>7. BIBLIOGRAGÍA .....</b>	<b>56</b>
7.1 LIBROS .....	56
7.2 ARTÍCULOS CIENTÍFICOS .....	56
7.3 PÁGINAS WEB .....	56
<b>APÉNDICE .....</b>	<b>57</b>
1. INTRODUCCIÓN OPC .....	58
2. OPC CLÁSICO.....	59
2.1 ACCESO DE DATOS OPC.....	61
2.2 ALARMA Y EVENTOS OPC.....	62
2.3 ACCESO OPC HISTORIAL DE DATOS .....	64
3. OPC UA.....	65
4. LIBRERÍA PROSYS OPC UA .....	70

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Proceso de laminación de dos etapas. ....	5
Ilustración 2: Acería de horno eléctrico. ....	7
Ilustración 3: Tren de alambón (parte superior) y tren de perfiles (parte inferior). ....	7
Ilustración 4: Arquitectura informática y de control de laminación. ....	12
Ilustración 5: Partes principales del horno ....	16
Ilustración 6: Volumen de control diferencial. ....	20
Ilustración 7: Nodos en un elemento rectangular. ....	25
Ilustración 8: Radiación incidente en un medio de cierto espesor ....	34
Ilustración 9: Balance energético en una superficie. ....	35
Ilustración 10: Factor de vista entre dos superficies infinitesimales. ....	36
Ilustración 11: Recinto formado por superficies negras. ....	37
Ilustración 12: División en zonas de las superficies y volúmenes del horno. ....	43
Ilustración 13: Algoritmo de funcionamiento principal. ....	47
Ilustración 14: Algoritmo de implementación modelo de radiación en el horno. ....	48
Ilustración 15: Algoritmo implementación modelo de transferencia de calor por conducción. ...	48
Ilustración 16: Módulos del programa de control. ....	49
Ilustración 17: Formato de los comentarios de atributos y métodos en Java para la generación del documento HTML. ....	50
Ilustración 18: Interfaz de usuario del horno. ....	52
Ilustración 19: Cuadro de diálogo con información de las palanquillas. ....	53
Ilustración 20: Gráfico con los valores la temperatura de una palanquilla. ....	54

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Titulo:	Desarrollo de una aplicación software para el seguimiento y estimación de la temperatura de calentamiento de palanquillas de acero inoxidable en un horno.
Tutor Empresa:	Miguel Ángel González González, Ingeniero Industrial.
Tutor Académico:	José María Enguita González, Ingeniero Informático.
Autora:	Sonia Madero García
Fecha:	Febrero de 2016
Financiación:	Proyecto financiado por la empresa Roldán, S.A.

### 1.2 VISIÓN GENERAL DEL DOCUMENTO

En el presente documento se pretende dar una visión del conjunto del proyecto a desarrollar, explicando cuáles han sido los motivos por los que ha surgido, cuál es el ámbito en el que se encuentra y cuáles son sus principales características. Además en él se incluye información acerca de la metodología empleada así como del entorno de desarrollo elegido.

### 1.3 DOCUMENTOS REFERENCIADOS

Se hace referencia al documento “*PlanoHorno*” contenido en la carpeta “*Planos*” e “*index*” contenido en la carpeta “*Javadoc*” adjuntados a esta memoria.

### 1.3 VISIÓN GENERAL DEL PROYECTO

En términos generales, la laminación del acero es un proceso de deformación plástica de los metales o aleaciones en el que se reduce el espesor inicial del material trabajado mediante las fuerzas de compresión que ejercen unos rodillos, cilindros de laminación, sobre la pieza o material de trabajo.

En la siguiente figura, se muestra el cambio en la estructura que sufre un material a medida que va pasando por distintas etapas en un proceso de laminación.

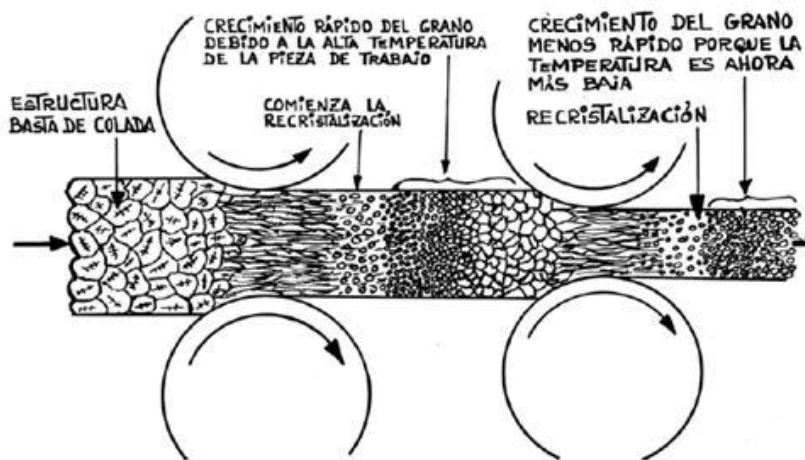


Ilustración 1: Proceso de laminación de dos etapas.

Los procesos de laminado se realizan, en su gran mayoría, en caliente por la gran deformación ejercida sobre el material trabajado.

En el proceso de laminado en caliente, el lingote o palanquilla de acero colado se calienta al rojo vivo en un horno denominado horno de termodifusión donde básicamente las palanquillas se elevan a temperaturas comprendidas entre los 900°C y los 1300°C

Si el calentamiento en el horno es insuficiente el metal será más difícil de trabajar debido a que posee una menor ductilidad y maleabilidad (propiedades que se le confieren al calentarlos a una temperatura adecuada) y presenta una mayor resistencia a la deformación pudiéndose originar grietas durante la laminación.

En cambio, una temperatura de calentamiento excesiva puede originar un crecimiento elevado de los granos y un defecto llamado “quemado del acero” que origina grietas en el material.

En definitiva, la temperatura a la que sale la palanquilla del horno es un factor crítico y determinante que condicionará en gran medida el proceso de laminado al que estará sometida a posteriori.

Por consiguiente, la temperatura de calentamiento se trata de uno de los principales factores que se deben controlar en el proceso de laminación.

En este contexto, se trata de desarrollar una aplicación software que nos permita, en todo momento, estimar el calentamiento al que están siendo sometidas las palanquillas en el horno.

Para ello, se desarrollará un modelo térmico de transferencia de calor capaz de reproducir la evolución de la temperatura de las palanquillas desde que entran hasta que salen del horno.

En principio, esta aplicación ha sido concebida para su única utilización dentro de Roldán, S.A.

## **2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA**

### **2.1 ROLDÁN, S.A**

Roldán es una empresa situada en la localidad de Ponferrada (León) perteneciente al grupo Acerinox. Se dedica a la fabricación de productos largos de acero inoxidable cuya gama de productos incluye barras, alambión, ángulos, pletinas y corrugado.

#### **2.1.1 Acería**

Se trata de un proceso de fusión de materias primas para la obtención de palanquillas de acero inoxidable.

En los orígenes, la parte correspondiente a la obtención de los lingotes de acero tenía lugar en la propia fábrica. En cambio, a día de hoy, la acería se encuentra desmantelada y las palanquillas son suministradas desde Algeciras (Cádiz) por parte de Acerinox Europa, S.A.U.

Las materias primas empleadas son chatarra (tanto férrica con inoxidable) y distintas ferroaleaciones.

Una vez cargado el horno eléctrico con las materias primas, se crea un arco eléctrico para fundir el material. El acero inoxidable fundido se vuelca en la cuchara de trasvase dirección al A.O.D (Argon Oxigen Decarburization) donde se realizarán las operaciones de descarbonación y afinado del acero.

En la colada continua el acero líquido pasará a estado sólido formándose cuerdas de palanquillas de sección cuadrada de 200 x 200 mm.

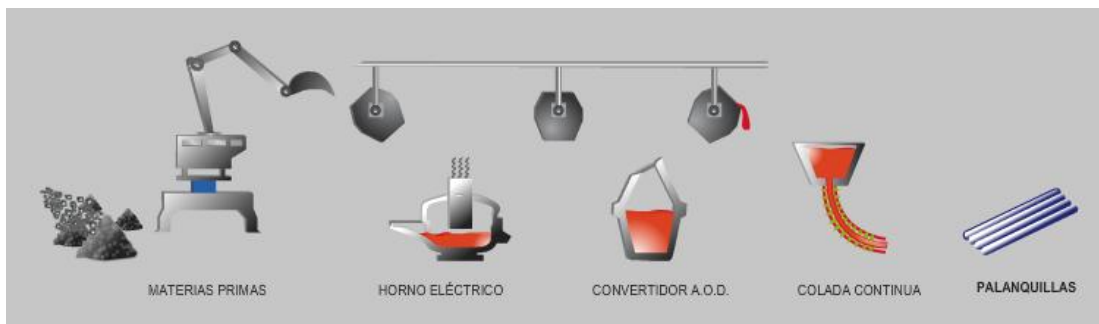


Ilustración 2: Acería de horno eléctrico.

### 2.1.2 Laminación

Una vez la palanquilla sale del horno donde se ha visto sometida a un proceso de calentamiento, Roldán cuenta con dos trenes de laminación en caliente: tren de perfiles, tren de alambón.

- Tren de Perfiles, donde se laminan toda la gama de ángulos (desde 20 x 20 x 3 mm hasta 100 x 100 x 13), barras desde 35 hasta 130 mm de diámetro y pletinas.
- Tren de Alambón, donde se obtienen rollos de 2.400 Kg de peso, los mayores del mundo occidental en inoxidables, desde 5,5 hasta 41,5 mm de diámetro.

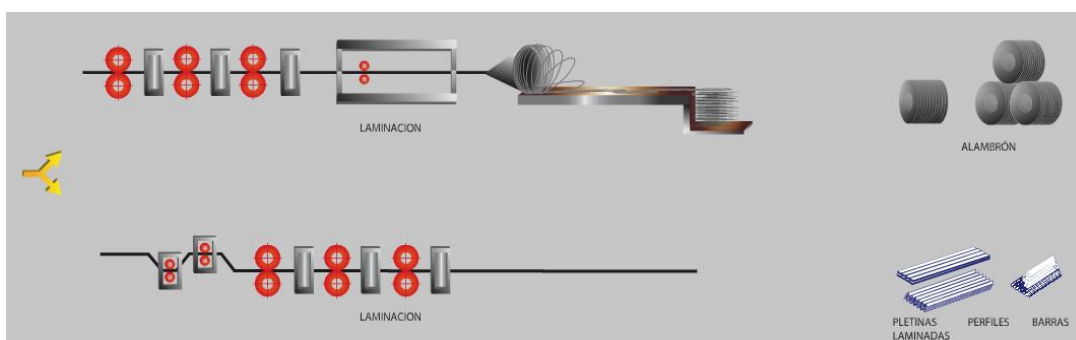


Ilustración 3: Tren de alambón (parte superior) y tren de perfiles (parte inferior).



En el tren de alambión, la palanquilla se conforma por medio e rodillos de laminación en formatos óvalo-redondos. Del mismo modo, en el tren de perfiles, la palanquilla es conformada pero esta vez para obtener perfiles (ángulos), barra (redondo súper-grueso) y pletina laminada.

### **2.1.3 Talleres de acabado**

En los talleres de acabados se dispone de:

- Hornos de recocido para la recuperación de la estructura o la eliminación de las posibles tensiones internas generadas en el material durante el proceso de laminación.
- Baños de decapado en continuo para eliminar los óxidos metálicos y partículas metálicas de la superficie del metal base. Los ácidos habitualmente empleados en las balsas de decapado son: ácido clorhídrico, sulfúrico y nítrico.
- Enderezadoras, descortezadoras y enderezadoras pulidoras para toda la gama de barra descortezada (habitualmente de 25 a 130 mm de diámetro).
- Máquinas combinadas (enderezado - calibrado - corte - pulido) para la obtención de barra calibrada (de 2 a 30 mm de diámetro).
- Rectificadoras para toda la gama de barra desde 2 a 85,72 mm con tolerancia hasta h8.
- Equipos de biselado y empuntado de barras.
- Equipos de detección de defectos.
- Acabados de perfiles en continuo, enderezado - granallado - decapado - inspección y embalado.

## 2.2 SISTEMA INFORMÁTICO DE ROLDÁN, S.A

### 2.2.1 Arquitectura general

En el sistema informático de Roldán, S.A. se pueden identificar distintos niveles en cuanto a su alcance y función:

- Nivel de Control: integrado por los sistemas de control de procesos (autómatas, reguladores, etc.) y sus interfaces de operador (Scada). Están conectados a una red Ethernet de proceso.
- Sistema de Planificación de Recursos Empresariales: sistema informático cliente-servidor que gestiona recursos humanos, inventario, ventas, pedidos, balances económicos, producción. Constituido por un sistema eServer iSeries de IBM. Accesible desde la intranet de Roldán y por las comerciales en distintos puntos del mundo.
- Nivel 2: sistema informático cliente-servidor que, por una parte, sirve como interfaz de comunicación entre el nivel de Control y Sistema de Planificación de Recursos Empresariales, transmitiendo recetas de producción y obteniendo información del estado actual de la producción, y por otra permite acceder a información de proceso y trazabilidad de los productos de los principales procesos productivos: laminación (horno y trenes de laminación), recocido, decapado y acabado en frío (enderezado, corte, pulido y rectificado)

### 2.2.2 Descripción general Nivel 2

Las funciones del Nivel 2 son:

- Enviar al sistema de control la identificación de los productos y sus correspondientes consignas de producción adecuadas según su tipo almacenadas en el iSeries.
- Determinar el estado en el proceso productivo de los distintos productos a los que asigna estadísticas y valores brutos de las variables de proceso que almacena en una base de datos de históricos.
- Informar al iSeries sobre el estado en el proceso productivo de los productos.

- Proporcionar a los usuarios-cliente de Nivel 2 sinópticos y gráficas de productos, parámetros y variables de proceso, generando alarmas cuando ciertas variables de proceso incumplan restricciones según el tipo de producto recogidas en normas técnicas internas.

- Proporcionar a los usuarios-cliente consultas sobre productos producidos, variables de proceso y calidad asociadas a éstos, así como informes y gráficos.

La comunicación con los distintos sistemas de control conectados a la red Ethernet de proceso se realiza mediante tres servidores OPC KepserverEx V5 de Kepware, para laminación, recocido-decapado y acabados, respectivamente. En algunos casos, la comunicación con algunos dispositivos se resuelve con soluciones particulares: comunicación serie, sockets TCP/IP, etc. implementando el protocolo correspondiente. Por otra parte, la comunicación con el iSeries de IBM se realiza mediante sockets TCP/IP, bien con mensajes simples, bien con transferencia de ficheros. Los clientes de Nivel 2 se comunican con los servidores de Nivel 2 como clientes OPC UA para obtener información actual, o mediante transferencia de ficheros mediante sockets TCP/IP para acceder a información histórica.

### **2.2.3 Arquitectura informática y de control de Laminación**

El sistema de control de laminación está integrado por varios autómatas S7-400 conectados a una red Ethernet de proceso. Sin embargo, el control y regulación del horno está constituido por un autómata S5 y un sistema de control distribuido de reguladores, los cuales están aislados de éste. Ambos cuentan con su respectivo interfaz de operador, scada de Seguimiento y de Temperaturas, respectivamente.

La trazabilidad de productos en el horno y en los dos trenes de laminación está soportada por una base de datos en el Servidor OPC KepserverEx accesible mediante OPC UA por los clientes de Nivel 2. Un módulo de Nivel 2 denominado Lamina2Master identifica las palanquillas al Scada del Seguimiento y es notificado por este cuando una palanquilla es enhornada o deshornada. Asimismo, por su acceso al sistema de control de laminación, determina los estados de las palanquillas en el proceso actualizando la base de datos de trazabilidad.

Otro módulo, Lamina2Temperaturas registra las variables de proceso que afectan a las palanquillas laminadas que se transfieren a una base de datos de históricos.

Otro sistema informático, no integrado en el Nivel 2 de Roldán, es el denominado HOT (Heat Operator Terminal) desarrollado por la empresa Stein. Sus funciones principales son:

- Conocer la posición, tipo de acero e identificación de cada palanquilla en el horno.
- Determinar, a cada instante, la temperatura en la superficie y corazón de cada palanquilla y generar históricos de su evolución en el tiempo.
- Registrar y visualizar variables de proceso.
- Fijar las consignas de temperatura de los reguladores del horno de acuerdo al tipo de acero de las palanquillas y su situación.
- En función de las paradas y cadencia de producción real, y de la estimación de la temperatura a la salida del horno, modificar las consignas de temperatura para que alcancen sus temperaturas objetivo.
- Modificar los parámetros de los reguladores mediante reglas difusas según el ritmo de calentamiento.

El Scada de seguimiento comunica al HOT la identificación, sección, longitud y tipo de acero, así como la indicación del movimiento adelante-atrás de la palanquilla mediante una conexión Ethernet punto-a-punto. Por otra parte, el HOT se conecta a la red RS-422 de los reguladores de temperatura y presión Chameleon de Otic F&P.

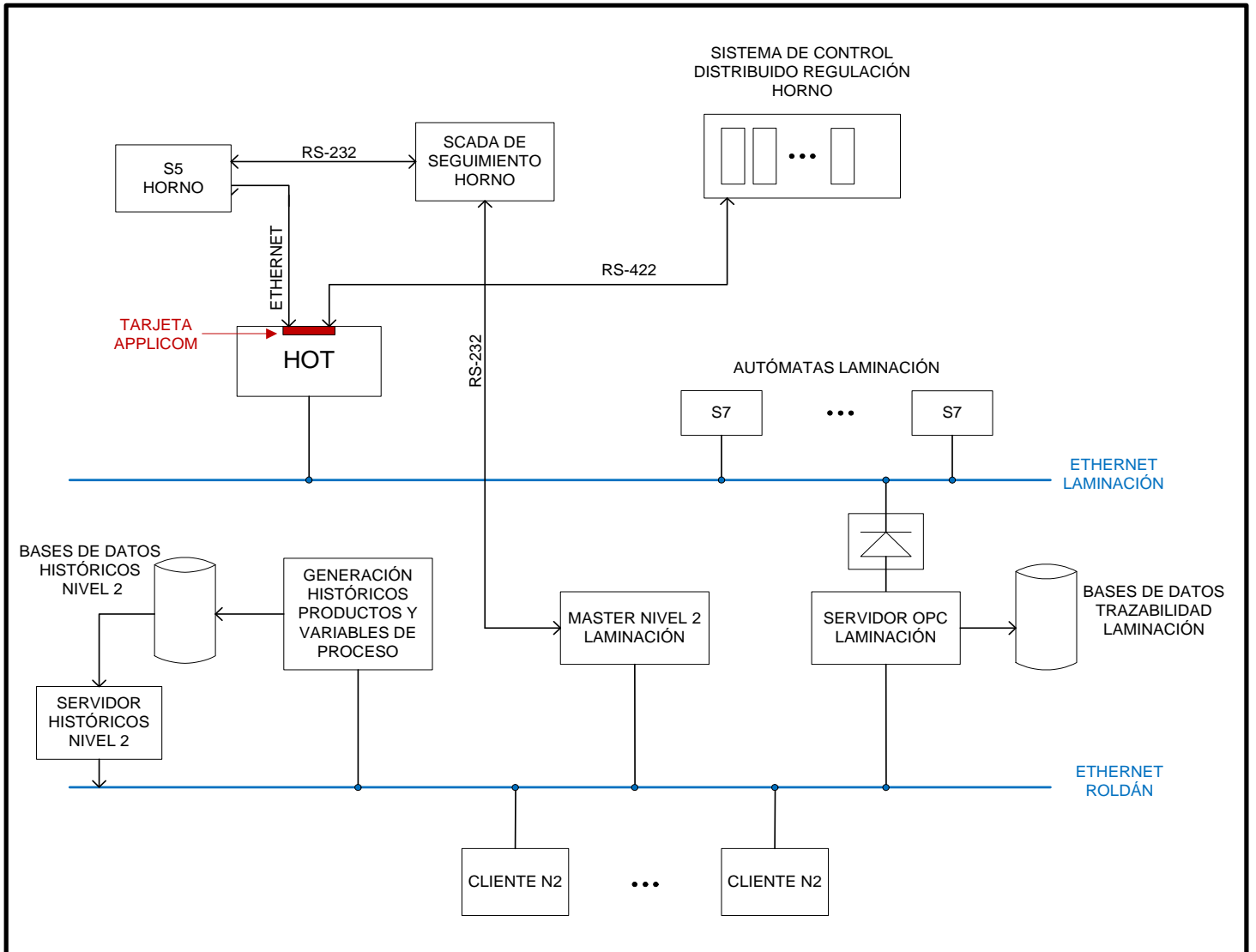


Ilustración 4: Arquitectura informática y de control de laminación.

### 3. OBJETO

El objeto del presente trabajo consiste en implementar un módulo dentro del sistema de Nivel 2 de Roldán que reproduzca la funcionalidad más útil del HOT y finalmente lo sustituya. Ésta es:

- Realizar el seguimiento de las palanquillas en el horno.
- Calcular el calentamiento de cada palanquilla y registrar históricos de las temperaturas para su posterior explotación en el nivel 2.
- Registrar históricos de las variables de proceso del horno para su posterior explotación en el Nivel 2.

### 4. DISEÑO Y DESARROLLO

Como ha de ser un módulo del Nivel 2 de Roldán, el lenguaje y tecnología de software a emplear quedan determinados de antemano: java y JavaFX.

Java es un lenguaje de programación orientado a objetos derivado de C++ pero que se diferencia de este principalmente en que no utiliza punteros y en que no es necesario preocuparse de la liberación de memoria, pues de ello ya se encarga automáticamente el recolector de basuras. Las aplicaciones Java se compilan a bytecode, un tipo de instrucciones que una Máquina Virtual Java (JVM) puede ejecutar. De esta manera la misma compilación puede ejecutarse con sistemas operativos diferentes. Basta instalar en la máquina correspondiente un Entorno de Ejecución de Java (JRE) adecuado, el cual incluye una JVM así como otras librerías y componentes necesarios.

JavaFX, por otra parte, es una plataforma de software de Oracle que permite el desarrollo de aplicaciones de escritorio y aplicaciones de Internet enriquecidas (Rich Internet Application o RIA) que soporta los sistemas operativos Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8, Mac OSX y Linux.

Por último, la aplicación debe implementar un cliente OPC UA en java, para lo cual se ha utilizado un kit de desarrollo adquirido por Roldán a la compañía Prosys OPC. La arquitectura Comunicaciones de plataforma Abierta (Open Platform Communications ó OPC) Arquitectura Unificada (UA) proporciona un estándar de comunicaciones interoperable, es decir, que permite intercambiar y utilizar información entre dos o más sistemas, particularmente entre sistemas de control de proceso y el sistema informático

de empresa. Ha sido desarrollada por la OPC Foundation con el fin de resolver los inconvenientes planteados por su predecesor OLE para Control de Procesos (OLE for Process Control ó OPC, donde OLE es una tecnología de Microsoft para el intercambio de información entre aplicaciones).

Los dos principales problemas a resolver son implementar el seguimiento de las palanquillas del horno y el modelo de calentamiento que permita estimar, para cada palanquilla, su temperatura en función de la medida de temperaturas en el interior horno y de su posición.

#### **4.1 TRAZABILIDAD DE LAS PALANQUILLAS EN EL HORNO**

La base de datos de trazabilidad de palanquillas en Laminación servida vía OPC UA consiste en tres tablas, una para la mesa de carga y el horno, otra para el tren de alambrón y otra para el tren de perfiles. Cada registro de la tabla corresponde a una palanquilla y tiene como campos la identificación de la palanquilla, su estado en el proceso, un campo de datos (tipo de acero, dimensiones, producto y medida a fabricar, etc.) y un índice que establece su orden dentro de la tabla. Esta base de datos proporciona entonces la relación ordenada de las palanquillas que están actualmente en el horno, pero no su posición. Así, el primer trabajo a realizar fue añadir un campo nuevo a la tabla del horno que contuviera información variable: posición en el horno, temperatura de la cara superior, temperatura en la cara inferior y temperatura en el corazón.

Cada vez que el módulo de Nivel 2 Lamina2Master detecta que una palanquilla entra en el horno inicializa el valor de posición de la palanquilla correspondiente.

Los modos de funcionamiento del horno son dos: modo automático y modo manual pudiéndose pasar de uno a otro en cualquier momento.

En modo automático, el periodo de avance está fijado de antemano.

En cambio, cuando el control del avance en el horno pasa a modo manual es el propio operario el que hace avanzar (o retroceder) el horno a su antojo.

En cualquiera de los dos casos, el problema es detectar cuando el horno realiza el movimiento de un paso hacia delante o hacia atrás que incremente o decremente respectivamente los valores de posición de todas las palanquillas contenidas en el horno.

Debido a las limitaciones de comunicación que plantea el autómatas S5 del horno, se decidió cablear dos señales binarias (adelante y atrás) a un autómatas accesible desde la Ethernet de proceso de Laminación. En un futuro se considera migrar a un autómatas superior. Con este cambio, Lamina2Master detecta la activación de estas dos señales y actualiza las posiciones de las palanquillas afectadas.

## **4.2 MODELO DE CALENTAMIENTO**

### **4.2.1 El horno**

El horno de calentamiento es una parte esencial del proceso de laminado ya que con él una palanquilla adquiere la temperatura adecuada para ser laminada y producir alambrón, barras o ángulos. Aunque en distintos puntos del proceso hay instalados pirómetros que registran las temperaturas de las palanquillas a su paso por las distintas cajas, en el interior del horno no es posible. Sólo podemos conformarnos con una estimación.

Las palanquillas son cargadas en el horno con su eje principal perpendicular al eje de desplazamiento de este, constituyendo un manto horizontal, siendo el calor aportado por quemadores de gas tangenciales situados en la bóveda y en la solera. El recorrido dentro del horno está dividido en tres zonas: precalentamiento, calentamiento e igualación, y para cada una de ellas se considera de manera independiente una parte de bóveda, por encima del manto, y de solera, por debajo del manto. El calentamiento de las zonas de calentamiento e igualación se realiza mediante quemadores en los que se regula el caudal de gas y aire, de forma que la temperatura medida por el termopar de cada zona y parte sigue un valor de consigna prefijado. Es decir, el horno cuenta con cuatro reguladores: calentamiento superior, calentamiento inferior, igualación superior e igualación inferior. La temperatura de la zona de precalentamiento es aportada por un intercambiador alimentado por la temperatura de los gases y humos evacuados por la chimenea.

El diseño real del horno se muestra en el plano adjunto a esta memoria: “PlanoHorno”



En la siguiente figura, se muestra una vista del horno con sus partes principales:

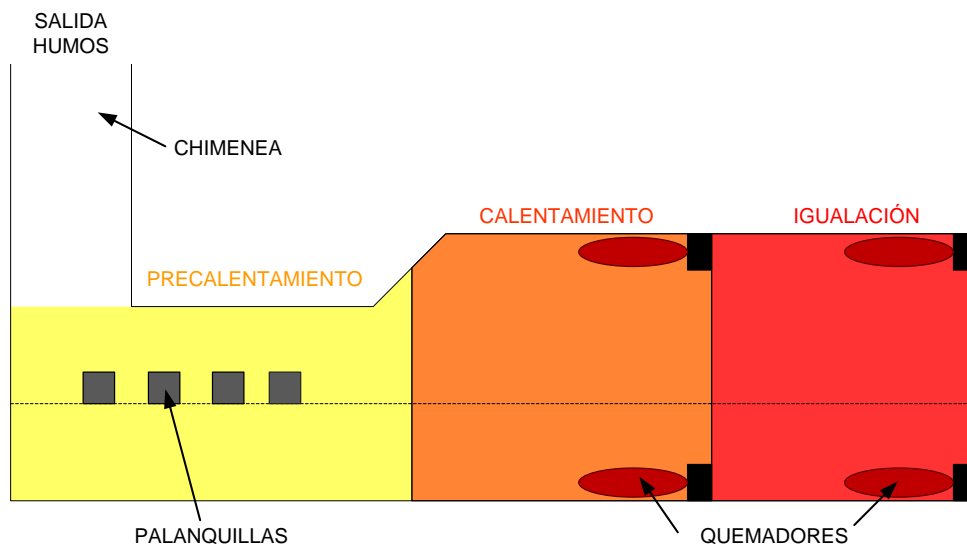


Ilustración 5: Partes principales del horno

#### 4.2.2 Transferencia de calor

La transferencia de calor es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura. Cuando un cuerpo está a una temperatura diferente a la de su entorno o a la de otro cuerpo, la transferencia de calor o intercambio de calor, ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico. Como resultado del segundo principio de la termodinámica, la transferencia de calor siempre ocurre desde un cuerpo más caliente a uno más frío. Así mismo, cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos en proximidad uno del otro, la transferencia de calor no puede ser detenida, sólo puede hacerse más lenta.

Las tres formas básicas de transferencia de calor son tres: radiación, conducción y convección.

- **CONDUCCIÓN:** es un proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia, por el que el calor fluye desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura que está en contacto con el primero. La propiedad física de los materiales que determina su capacidad para conducir el calor es la conductividad térmica.

Por ejemplo, se tiene una barra metálica con un extremo a 80°C y a 20°C el otro, si no se da ninguna otra influencia externa, habrá una transferencia de calor por conducción desde el extremo caliente hacia el frío hasta alcanzar el equilibrio.

- **CONVECCIÓN:** En este sistema de transferencia de calor interviene un fluido (gas o líquido) en movimiento que transporta la energía térmica entre dos zonas.

La transmisión de calor por convección puede ser:

- Forzada:** a través de un ventilador (aire) o bomba (agua) se mueve el fluido a través de una zona caliente y éste transporta el calor hacia la zona fría.

- Natural:** el propio fluido extrae calor de la zona caliente y cambia su densidad haciendo que se desplace hacia la zona más fría donde cede su calor.

- **RADIACIÓN:** Es el calor emitido por un cuerpo debido a su temperatura, en este caso no existe contacto entre los cuerpos, ni fluidos intermedios que transporten el calor. Simplemente por existir un cuerpo A (sólido o líquido) a una temperatura mayor que un cuerpo B existirá una transferencia de calor por radiación de A a B.

Para que este fenómeno se perciba es necesario un cuerpo a una temperatura bastante elevada ya que la transferencia térmica en este caso depende de la diferencia de temperaturas a la cuarta potencia:  $T_a^4 - T_b^4$ .

### **Leves de la transferencia de calor**

Para la conducción de calor, la ecuación es conocida como la *Ley de Fourier* y viene expresada para una dirección como:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

Donde:

$q_x$  es el flujo de calor en la dirección x  $[\frac{W}{m^2}]$

K es la conductividad térmica del material  $[\frac{W}{m \cdot K}]$

$\frac{\partial T}{\partial x}$  es el gradiente de temperatura  $[\frac{K}{m}]$

Para la transferencia de calor por convección, la ecuación de velocidad viene dada por la *Ley de Newton* del enfriamiento como:

$$q = -h(T_w - T_a)$$

Donde:

$q$  es el flujo de calor por convección. Se mide en:  $[\frac{W}{m^2}]$

$h$  es el coeficiente de transferencia de calor, también conocido como coeficiente de película. Sus unidades en el sistema internacional son:  $[\frac{W}{m^2 K}]$

$T_w - T_a$  es la diferencia de temperatura entre la pared del material en contacto con el fluido y la temperatura del fluido.

El flujo máximo que puede ser emitido por radiación desde un cuerpo negro viene dado por la *Ley de Stefan-Boltzmann* que es:

$$q = \sigma T_w^4$$

Donde:

$q$  es el flujo de calor por radiación cuyas unidades son  $[\frac{W}{m^2}]$

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann que es igual a  $5.669 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$T_w$  es la temperatura de la superficie [K]

El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el emitido por un cuerpo negro y viene dado por la siguiente expresión:

$q = \varepsilon \sigma T_w^4$  donde  $\varepsilon$  es la propiedad de radiactividad de la superficie. Es conocida como emisividad.

En este contexto, la implementación del modelo de calentamiento de cada palanquilla constará de dos partes:

1. El modelo de transferencia de calor por conducción desde el exterior al corazón del inoxidable. Puede resolverse por los métodos de diferencias finitas o de elementos finitos. En este trabajo nos hemos decantado por el segundo sin valorar las ventajas o inconvenientes que podría haber planteado el primero.

2. El modelo de transferencia de calor por radiación que permitirá el cálculo del flujo de calor recibido por la superficie de la palanquilla, radiado desde las paredes del horno y el gas, y determinado por la geometría del horno, la posición de la palanquilla, las medidas de caudal de gas y aire de los quemadores y los valores de temperatura medidos en las partes superior e inferior de las zonas de precalentamiento, calentamiento e igualación. Hemos descartado el flujo de calor a la palanquilla por convección desde los gases en circulación en el horno pues su contribución es menor que el 5% del total (Zongyu Li 1982, p. 14).

### 4.3 MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN EN UNA PALANQUILLA POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

#### 4.3.1 Ecuaciones generales

Se considerará el volumen de control diferencial para el análisis de la conducción de calor que vemos en la figura siguiente.

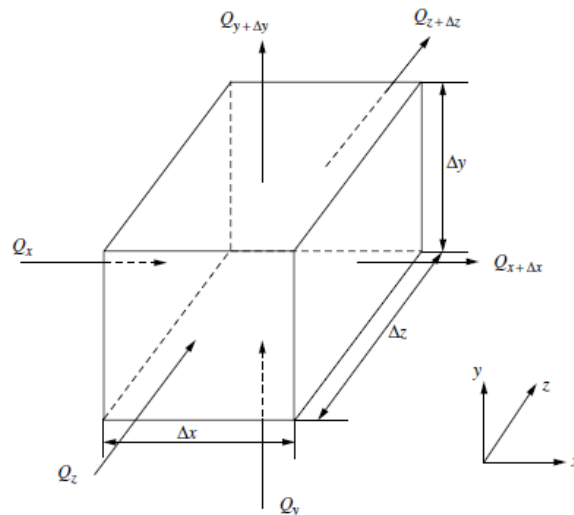


Ilustración 6: Volumen de control diferencial.

El balance de energía debe verificar:

Energía entrada + energía generada = energía almacenada + energía de salida

$$G \Delta x \Delta y \Delta z + Q_x + Q_y + Q_z = \rho \Delta x \Delta y \Delta z C_p \frac{\partial T}{\partial t} + Q_{x+\Delta x} + Q_{y+\Delta y} + Q_{z+\Delta z} \quad [1]$$

Donde  $\rho$  es la densidad del materia y  $C_p$  su calor específico. Desarrollando en serie de Taylor los términos de la energía de salida, se tiene:

$$Q_{x+\Delta x} = Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} \Delta x$$

$$Q_{y+\Delta y} = Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \Delta y$$

$$Q_{z+\Delta z} = Q_z + \frac{\partial Q_z}{\partial z} \Delta z$$

De acuerdo a la Ley de Fourier de transmisión de calar, la transferencia de calor en cada dirección se obtiene como:

$$Q_x = -k_x \Delta y \Delta z \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$Q_y = -k_y \Delta x \Delta z \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$Q_z = -k_z \Delta x \Delta y \frac{\partial T}{\partial z}$$

Donde  $k_x$ ,  $k_y$  y  $k_z$  son las conductividades térmicas en las direcciones x, y, z, respectivamente. Sustituyendo en [1] tenemos la ecuación general de transmisión de calor por conducción

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + G \quad [2]$$

Para resolver esta ecuación necesitamos conocer las condiciones iniciales y en los límites, que pueden tomar alguna de las siguientes formas:

- Condición Dirichlet  $T = T_o$  en una superficie  $\Gamma_T$
- Condición Neuman  $q = -k \frac{\partial T}{\partial n} = C$  en una superficie  $\Gamma_{qt}$ , con  $C = 0$  para una superficie aislada o adiabática, ó  $-k \frac{\partial T}{\partial \bar{u}} = h(T_w - T_a)$  en una superficie  $\Gamma_{qc}$

Siendo  $\bar{u}$  el vector normal a la superficie considerada, h la constante de convección,  $T_w$  la temperatura superficial y  $T_a$  la temperatura del ambiente. Debido a la dificultad de obtener una expresión analítica que resuelva estas ecuaciones, vamos a aplicar el método de elementos finitos.

Estas condiciones iniciales y límite pueden expresarse de manera más general como:

$$K \frac{\partial T}{\partial \bar{u}} = k_x \frac{\partial T}{\partial x} \tilde{l} + k_y \frac{\partial T}{\partial y} \tilde{m} + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \tilde{n} = -h(T - T_a) \text{ en la superficie } \Gamma$$

Siendo l, m, n los vectores de dirección coseno de la normal de la superficie límite

### 4.3.2 Discretización en el espacio por el método Galerkin

Se discretizará el volumen o superficie que constituye el dominio de la ecuación de transferencia de calor que queremos resolver. Esta discretización se consigue dividiendo el dominio en elementos cuyos vértices son ocupados por nodos. Necesitamos entonces aproximar la temperatura en cualquier punto incluido en un elemento como combinación lineal de los valores de temperatura conocidos de los nodos del elemento.

Así, para un elemento formado por n nodos vamos a considerar que la temperatura en algún punto del elemento dado por sus coordenadas (x,y) es:

$$T(x, y) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y) \cdot T_i$$

A continuación vamos a discretizar en el espacio la ecuación [2] siguiendo el método Galerkin. Este método requiere que se satisfaga la ecuación

$$\int_{\Omega} N_i \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ k_{xi} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_{yi} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_{zi} \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \rho C_i \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega = 0 \quad \text{para } i=1, \dots, n$$

siendo:

$\rho$  densidad

$C_i$  calor específico en el nodo i del elemento

$\Omega$  dominio del sistema

$k_{xi}, k_{yi}, k_{zi}$  componentes de la conductividad térmica en las direcciones x, y, z en el nodo i

Según el lema de Green

$$\int_{\Omega} \alpha_1 \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} d\Omega = - \int_{\Omega} \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} \alpha_2 d\Omega + \int_{\Gamma} \alpha_1 \alpha_2 \bar{u} d\Gamma \quad \text{donde } \bar{u} \text{ es el coseno director normal a } \Gamma$$

Si  $\alpha_1 = N_i$ ,  $\alpha_2 = K \partial T / \partial x$

$$\int_{\Omega} N_i \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ k_{xi} \frac{\partial T}{\partial x} \right] \right] d\Omega = - \int_{\Omega} k_{xi} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} d\Omega + \int_{\Gamma} k_{xi} N_i \frac{\partial T}{\partial x} \tilde{l} d\Gamma$$

por tanto

$$\int_{\Omega} N_i \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ k_{xi} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_{yi} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_{zi} \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \rho C_i \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega =$$

$$\begin{aligned}
& - \int_{\Omega} \left( k_{xi} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{yi} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{zi} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + \rho N_i C_i \frac{\partial T}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Gamma} k_{xi} N_i \frac{\partial T}{\partial x} \tilde{l} d\Gamma + \int_{\Gamma} k_{yi} N_i \frac{\partial T}{\partial y} \tilde{m} d\Gamma + \int_{\Gamma} k_{zi} N_i \frac{\partial T}{\partial z} \tilde{n} d\Gamma \\
& = - \int_{\Omega} \left( k_{xi} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{yi} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{zi} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + \rho N_i C_i \frac{\partial T}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Gamma} N_i \left( k_{xi} \frac{\partial T}{\partial x} \tilde{l} + k_{yi} \frac{\partial T}{\partial y} \tilde{m} + k_{zi} \frac{\partial T}{\partial z} \tilde{n} \right) d\Gamma \\
& = \int_{\Omega} \left( k_{xi} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{yi} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{zi} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + \rho N_i C_i \frac{\partial T}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Gamma} N_i h (T - T^a) d\Gamma = 0 \text{ para } i = 1, \dots, n
\end{aligned}$$

Como

$$\begin{aligned}
T &= \sum_{i=1}^n N_i T_i \Rightarrow \\
\frac{\partial T}{\partial x} &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j}{\partial x} T_j \\
\frac{\partial T}{\partial t} &= \sum_{j=1}^n N_j \frac{\partial T_j}{\partial t}
\end{aligned}$$

Entonces

$$\int_{\Omega} \left( k_{xi} \frac{\partial N_i}{\partial x} \sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j}{\partial x} T_j + k_{yi} \frac{\partial N_i}{\partial y} \sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j}{\partial y} T_j + k_{zi} \frac{\partial N_i}{\partial z} \sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j}{\partial z} T_j + N_i N_j \rho C_i \sum_{j=1}^n \frac{\partial T_j}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Gamma} h N_i \sum_{j=1}^n N_j T_j d\Gamma = \int_{\Gamma} h N_i T^a d\Gamma$$

para  $i = 1, \dots, n$

que expresado en forma matricial, queda

$$[C] \left[ \frac{\partial T}{\partial t} \right] + [K][T] = [f]$$

donde

$$[T] = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_n \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial t} \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} \\ \dots \\ \frac{\partial T_n}{\partial t} \end{bmatrix}$$

siendo:

- [C]            matriz de capacitancia
- [ $\partial T/\partial t$ ]    vector de variación de temperatura en el tiempo
- [T]            vector de temperatura
- [K]            matriz de resistencia
- [f]            vector de fuerza exterior

de modo que

$$C_{ij} = \int_{\Omega} \rho N_i N_j C_i d\Omega$$

$$K_{ij} = \int_{\Omega} \left( k_{xi} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_{yi} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + k_{zi} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega + \int_{\Gamma} h N_i N_j T_j d\Gamma$$

$$f_i = \int_{\Gamma} h N_i T^a d\Gamma$$

### 4.3.3 Elemento rectangular

Se considerará un elemento rectangular, centrado en su centro, con dimensiones  $2a \times 2b$

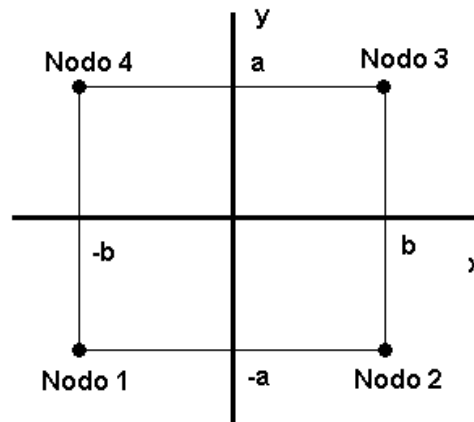


Ilustración 7: Nodos en un elemento rectangular.

$$N_1 = \frac{(b-x)(a-y)}{4ab}$$

$$N_2 = \frac{(b+x)(a-y)}{4ab}$$

$$N_3 = \frac{(b+x)(a+y)}{4ab}$$

$$N_4 = \frac{(b-x)(a+y)}{4ab}$$

$T_{ij}^a$  es la temperatura ambiente entre los nodos  $i, j$

$h_{ij}$  es el coeficiente de transferencia térmica entre los nodos  $i, j$  que engloba una componente de convección ( $h_c$ ) y una, linealizada, de radiación ( $h_r$ )

$$q = A(h_c(T - T_a) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_a^4)) = A(h_c(T - T_a) + \varepsilon\sigma(T^2 + T_a^2)(T + T_a)(T - T_a))$$

$$q = A(h_c(T - T_a) + h_r(T - T_a)) = A(h_c + h_r)(T - T_a)$$

$$h_r = \varepsilon\sigma(T^2 + T_a^2)(T + T_a)$$

siendo:

$q$  flujo de calor

$A$  superficie en la que se produce el flujo de calor

$h_c$  coeficiente de transferencia térmica por convección

$\varepsilon$ : emisividad de la superficie

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann

Considerando este elemento rectangular

$$\int_{\Omega} f(x, y) d\Omega = \int_{-a}^a \int_{-b}^b f dx dy$$

$$\int_{\Gamma} f(x, y) d\Gamma = \int_{-b}^b f(x, -a) dx + \int_{-a}^a f(b, y) dy + \int_{-b}^b f(x, a) dx + \int_{-a}^a f(-b, y) dy$$

#### 4.3.4 Obtención de los componentes de las matrices que rigen la evolución dinámica para un elemento rectangular

##### MATRIZ DE CAPACITANCIA

$$C_{ij} = \int_{\Omega} \rho N_i N_j C_i d\Omega = \int_{-a}^a \int_{-b}^b \rho C_i N_i N_j dx dy = \rho C_i \int_{-a}^a \int_{-b}^b N_i N_j dx dy$$

$$C_{11} = \rho C_1 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b-x)^2 (a-y)^2}{16a^2 b^2} dx dy = \frac{\rho C_1}{16a^2 b^2} \int_{-a}^a (b-x)^2 dx \int_{-b}^b (a-y)^2 dy = \frac{4\rho C_1 ab}{9}$$

$$C_{12} = \rho C_1 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b^2 - x^2)(a-y)^2}{16a^2 b^2} dx dy = \frac{2\rho C_1 ab}{9}$$

$$C_{13} = \rho C_1 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b^2 - x^2)(a^2 - y^2)}{16a^2 b^2} dx dy = \frac{\rho C_1 ab}{9}$$

$$C_{14} = \rho C_1 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b-x)^2 (a^2 - y^2)}{16a^2 b^2} dx dy = \frac{2\rho C_1 ab}{9}$$

$$C_{21} = \frac{2\rho C_2 ab}{9}$$

$$C_{22} = \rho C_2 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b+x)^2 (a-y)^2}{16a^2 b^2} dx dy = \frac{4\rho C_2 ab}{9}$$

$$C_{23} = \rho C_2 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b+x)^2 (a^2 - y^2)}{16a^2 b^2} dx dy = \frac{2\rho C_2 ab}{9}$$

$$C_{24} = \rho C_2 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b^2 + x^2)(a^2 - y^2)}{16a^2 b^2} dx dy = \frac{\rho C_2 ab}{9}$$

$$C_{31} = \frac{\rho C_3 ab}{9}$$

$$C_{32} = \frac{2\rho C_3 ab}{9}$$

$$C_{33} = \rho C_3 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b+x)^2 (a+y)^2}{16a^2 b^2} dx dy = \frac{4\rho C_3 ab}{9}$$

$$C_{34} = \rho C_3 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b^2 - x^2)(a+y)^2}{16a^2b^2} dx dy = \frac{2\rho C_3 ab}{9}$$

$$C_{41} = \frac{2\rho C_4 ab}{9}$$

$$C_{42} = \frac{\rho C_4 ab}{9}$$

$$C_{43} = \frac{2\rho C_4 ab}{9}$$

$$C_{44} = \rho C_4 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b-x)^2(a+y)^2}{16a^2b^2} dx dy = \frac{4\rho C_4 ab}{9}$$

Esta sería la representación “consistente” de la matriz de capacitancia. Sin embargo, se prefiere otra “agrupada” de modo que la matriz resulte diagonal. Existen varios métodos de diagonalización (método de suma de filas, de escalado de diagonal, utilizando funciones de interpolación alternativas, usando cuadratura nodal,...). Aquí optaremos por la primera, de modo que:

$$\bar{C}_{ii} = \sum_j^n C_{ij} = \rho C_i ab$$

$$\bar{C}_{ij} = 0, \forall i \neq j$$

### MATRIZ DE RESISTENCIA

$$K_{ij} = \int_{\Omega} \left( k_{xi} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_{yi} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + k_{zi} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega + \int_{\Gamma} h N_i N_j T_j d\Gamma$$

$$K_{ij} = \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left( k_{xi} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_{yi} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx dy + h_{12} \int_{-b}^b \frac{\partial N_i(x,-a)}{\partial x} \frac{\partial N_j(x,-a)}{\partial x} dx + h_{23} \int_{-a}^a \frac{\partial N_i(b,y)}{\partial x} \frac{\partial N_j(b,y)}{\partial x} dy + h_{34} \int_{-b}^b \frac{\partial N_i(x,a)}{\partial x} \frac{\partial N_j(x,a)}{\partial x} dx + h_{41} \int_{-a}^a \frac{\partial N_i(-b,y)}{\partial x} \frac{\partial N_j(-b,y)}{\partial x} dy$$

Calcularemos primero las derivadas parciales de las funciones de forma

$$\frac{\partial N_1}{\partial x} = -\frac{(a-y)}{4ab}$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial x} = \frac{(a-y)}{4ab}$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial x} = \frac{(a+y)}{4ab}$$

$$\frac{\partial N_4}{\partial x} = -\frac{(a+y)}{4ab}$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial y} = -\frac{(b-x)}{4ab}$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial y} = -\frac{(b+x)}{4ab}$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial y} = \frac{(b+x)}{4ab}$$

$$\frac{\partial N_4}{\partial y} = \frac{(b-x)}{4ab}$$

$$\begin{aligned} K_{11} &= k_{x1} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(a-y)^2}{16a^2b^2} dx dy + k_{y1} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b-x)^2}{16a^2b^2} dx dy + h_{12} \int_{-b}^b \frac{4a^2(b-x)^2}{16a^2b^2} dx + h_{41} \int_{-a}^a \frac{4b^2(a-y)^2}{16a^2b^2} dy \\ &= k_{x1} \frac{a}{3b} + k_{y1} \frac{b}{3a} + h_{12} \frac{2b}{3} + h_{41} \frac{2a}{3} \end{aligned}$$

$$K_{12} = k_{x1} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{-(a-y)^2}{16a^2b^2} dx dy + k_{y1} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b^2-x^2)}{16a^2b^2} dx dy + h_{12} \int_{-b}^b \frac{4a^2(b^2-x^2)}{16a^2b^2} dx = -k_{x1} \frac{a}{3b} + k_{y1} \frac{b}{6a} + h_{12} \frac{b}{3}$$

$$K_{13} = k_{x1} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{-(a^2-y^2)}{16a^2b^2} dx dy + k_{y1} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{-(b^2-x^2)}{16a^2b^2} dx dy = -k_{x1} \frac{a}{6b} - k_{y1} \frac{b}{6a}$$

$$K_{14} = k_{x1} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(a^2-y^2)}{16a^2b^2} dx dy + k_{y1} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{-(b-x)^2}{16a^2b^2} dx dy + h_{41} \int_{-a}^a \frac{4b^2(a^2-y^2)}{16a^2b^2} dy = k_{x1} \frac{a}{6b} - k_{y1} \frac{b}{6a} + h_{41} \frac{a}{3}$$

$$K_{21} = -k_{x2} \frac{a}{3b} + k_{y2} \frac{b}{6a} + h_{12} \frac{b}{3}$$

$$\begin{aligned} K_{22} &= k_{x2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(a-y)^2}{16a^2b^2} dx dy + k_{y2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b+x)^2}{16a^2b^2} dx dy + h_{12} \int_{-b}^b \frac{4a^2(b+x)^2}{16a^2b^2} dx + h_{23} \int_{-a}^a \frac{4b^2(a-y)^2}{16a^2b^2} dy \\ &= k_{x2} \frac{a}{3b} + k_{y2} \frac{b}{3a} + h_{12} \frac{2b}{3} + h_{23} \frac{2a}{3} \end{aligned}$$

$$K_{23} = k_{x2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(a^2-y^2)}{16a^2b^2} dx dy + k_{y1} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{-(b+x)^2}{16a^2b^2} dx dy + h_{23} \int_{-a}^a \frac{4b^2(a^2-y^2)}{16a^2b^2} dy = k_{x2} \frac{a}{6b} - k_{y2} \frac{b}{3a} + h_{23} \frac{b}{3}$$

$$K_{24} = k_{x2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{-(a^2-y^2)}{16a^2b^2} dx dy + k_{y1} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{-(b^2-x^2)}{16a^2b^2} dx dy = -k_{x2} \frac{a}{6b} - k_{y2} \frac{b}{6a}$$

$$K_{31} = -k_{x3} \frac{a}{6b} - k_{y3} \frac{b}{6a}$$

$$K_{32} = k_{x3} \frac{a}{6b} - k_{y3} \frac{b}{3a} + h_{23} \frac{b}{3}$$

$$\begin{aligned} K_{33} &= k_{x3} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(a+y)^2}{16a^2b^2} dx dy + k_{y3} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b+x)^2}{16a^2b^2} dx dy + h_{23} \int_{-a}^a \frac{4b^2(a+y)^2}{16a^2b^2} dy + h_{34} \int_{-b}^b \frac{4a^2(b+x)^2}{16a^2b^2} dx \\ &= k_{x3} \frac{a}{3b} + k_{y3} \frac{b}{3a} + h_{34} \frac{2b}{3} + h_{23} \frac{2a}{3} \end{aligned}$$

$$K_{34} = k_{x3} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{-(a+y)^2}{16a^2b^2} dx dy + k_{y3} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b^2-x^2)}{16a^2b^2} dx dy + h_{34} \int_{-b}^b \frac{4a^2(b^2-x^2)}{16a^2b^2} dx = -k_{x3} \frac{a}{3b} + k_{y3} \frac{b}{6a} + h_{34} \frac{b}{3}$$

$$K_{41} = k_{x4} \frac{a}{6b} - k_{y4} \frac{b}{6a} + h_{41} \frac{a}{3}$$

$$K_{42} = -k_{x4} \frac{a}{6b} - k_{y4} \frac{b}{6a}$$

$$K_{43} = -k_{x4} \frac{a}{3b} + k_{y4} \frac{b}{6a} + h_{34} \frac{b}{3}$$

$$\begin{aligned} K_{44} &= k_{x4} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(a+y)^2}{16a^2b^2} dx dy + k_{y3} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{(b-x)^2}{16a^2b^2} dx dy + h_{12} \int_{-b}^b \frac{4a^2(b-x)^2}{16a^2b^2} dx + h_{41} \int_{-a}^a \frac{4b^2(a+y)^2}{16a^2b^2} dy \\ &= k_{x4} \frac{a}{3b} + k_{y4} \frac{b}{3a} + h_{34} \frac{2b}{3} + h_{41} \frac{2a}{3} \end{aligned}$$

### VECTOR FUERZA EXTERNA

$$f_i = \int_{\Gamma} h N_i T^a d\Gamma = \int_{-b}^b h_{12} N_i(x, -a) T_{12}^a dx + \int_{-a}^a h_{23} N_i(b, y) T_{23}^a dy + \int_{-b}^b h_{34} N_i(x, a) T_{34}^a dx + \int_{-a}^a h_{41} N_i(-b, y) T_{41}^a dy$$

$$f_1 = h_{12} T_{12}^a \int_{-b}^b \frac{2a(b-x)}{4ab} dx + h_{41} T_{41}^a \int_{-a}^a \frac{2b(a-y)}{4ab} dy = h_{12} T_{12}^a b + h_{41} T_{41}^a a$$

$$f_2 = h_{12} T_{12}^a \int_{-b}^b \frac{2a(b+x)}{4ab} dx + h_{23} T_{23}^a \int_{-a}^a \frac{2b(a-y)}{4ab} dy = h_{12} T_{12}^a b + h_{23} T_{23}^a a$$

$$f_3 = h_{23} T_{23}^a \int_{-a}^a \frac{2b(a+y)}{4ab} dy + h_{34} T_{34}^a \int_{-b}^b \frac{2a(b+x)}{4ab} dx = h_{23} T_{23}^a a + h_{34} T_{34}^a b$$

$$f_4 = h_{34} T_{34}^a \int_{-b}^b \frac{2a(b-x)}{4ab} dx + h_{41} T_{41}^a \int_{-a}^a \frac{2b(a+y)}{4ab} dy = h_{34} T_{34}^a b + h_{41} T_{41}^a a$$

### **Simplificaciones**

Consideraremos que el elemento es cuadrado, es decir,  $a=b$ , y que el material es isotrópico, es decir, que su conductividad térmica es igual en todas direcciones, es decir,  $k_x = k_y = k$ . Así,

$$[C] = \rho a^2 \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \rho a^2 \begin{bmatrix} 2\frac{k_1}{3} + \sum_{k=1}^4 \alpha(1,k)h_{1k} \frac{2a}{3} & -\frac{k_1}{6} + h_{12} \frac{a}{3} & -\frac{k_1}{3} & -\frac{k_1}{6} + h_{14} \frac{a}{3} \\ -\frac{k_2}{6} + h_{12} \frac{a}{3} & 2\frac{k_2}{3} + \sum_{k=1}^4 \alpha(2,k)h_{2k} \frac{2a}{3} & -\frac{k_2}{6} + h_{23} \frac{a}{3} & -\frac{k_2}{3} \\ -\frac{k_3}{3} & -\frac{k_3}{6} + h_{23} \frac{a}{3} & 2\frac{k_3}{3} + \sum_{k=1}^4 \alpha(3,k)h_{2k} \frac{2a}{3} & -\frac{k_3}{6} + h_{34} \frac{a}{3} \\ -\frac{k_4}{6} + h_{14} \frac{a}{3} & -\frac{k_4}{3} & -\frac{k_4}{6} + h_{34} \frac{a}{3} & 2\frac{k_4}{3} + \sum_{k=1}^4 \alpha(4,k)h_{2k} \frac{2a}{3} \end{bmatrix}$$

$$[f] = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^4 \alpha(1,k)h_{1k}T_{1k}^a \\ \sum_{k=1}^4 \alpha(2,k)h_{2k}T_{2k}^a \\ \sum_{k=1}^4 \alpha(3,k)h_{3k}T_{3k}^a \\ \sum_{k=1}^4 \alpha(4,k)h_{4k}T_{4k}^a \end{bmatrix}$$

siendo:

- $C_i$  calor específico en el nodo  $i$
- $k_i$  conductividad térmica en el nodo  $i$
- $\alpha(i,j)$  función que vale 1 si los nodos  $i,j$  son contiguos y 0 en caso contrario
- $h_{ij}$  constante de transferencia térmica entre los nodos  $i, j$
- $T_{ij}^a$  temperatura ambiental entre los nodos  $i,j$

### 4.3.5 Ensamblado de elementos

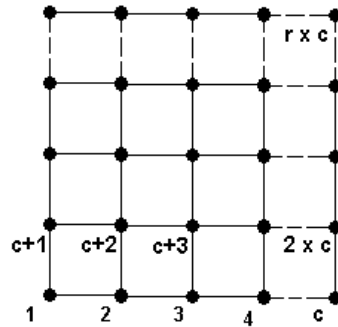


Ilustración 7. Conjunto de elementos rectangulares ensamblados en una malla.

Consideraremos una malla formada por  $c \times r$  nodos, siendo  $c$  el número de columnas y  $r$ , el número de filas. Tendremos entonces  $(c-1) \times (r-1)$  elementos. Cada elemento tiene un comportamiento dinámico definido por la ecuación:

$$[C] \left[ \frac{\partial T}{\partial t} \right] + [K][T] = [f]$$

siendo  $[C]$ ,  $[K]$  y  $[f]$  las matrices que hemos obtenido en la sección anterior. Tienen, por tanto, dimensiones  $4 \times 4$ ,  $4 \times 4$  y  $4 \times 1$ , respectivamente.

Debemos ensamblar las ecuaciones de todos los nodos para obtener las matrices  $[C]$ ,  $[K]$  y  $[f]$  que definen el comportamiento dinámico de toda la malla, y que tendrán dimensiones  $(r \times c) \times (r \times c)$ ,  $(r \times c) \times (r \times c)$  y  $(r \times c) \times 1$ , respectivamente.

Como resultado del ensamblaje, las expresiones de los componentes de estas matrices serán:

$$k_{ij} = \begin{cases} g(i, j) \frac{2k_i}{3} + \sum_{k=1}^4 \alpha(i, k) h_{ik} \frac{2a}{3}, \forall i = j \\ -g(i, j) \frac{k_i}{6} + h_{ij} \frac{a}{3}, \forall i, j | i \neq j, \alpha(i, j) = 1 \\ -\frac{k_i}{3}, \forall i, j | i \neq j, \beta(i, j) = 1 \\ 0, \forall i, j | i \neq j, \alpha(i, j) = 0, \beta(i, j) = 0 \end{cases}$$

$$f_i = \sum_{k=1}^4 \alpha(i, k) h_{ik} T_{ik}^a$$



Siendo:

$\alpha(i,j)$  función que vale 1 si los nodos  $i,j$  son contiguos y 0 en caso contrario

$\beta(i,j)$  función que vale 1 si los nodos  $i,j$  son opuestos y pertenecen al mismo elemento

$g(i)$  función que devuelve el número de elementos compartidos por el nodo  $i$

$g(i,j)$  función que devuelve el número de elementos compartidos por la línea que une  $i,j$

#### 4.3.6 Discretización en el tiempo

El comportamiento dinámico del sistema responde a la ecuación:

$$[C] \left[ \frac{\partial T}{\partial t} \right] + [K][T] = [f]$$

que expresada en forma discreta es:

$$[T]^{s+1} = \left( [C] + \vartheta \Delta t [K] \right)^{-1} \left( [C] - (1 - \vartheta) \Delta t [K] [T]^s + \Delta t \left[ \vartheta [f]^{s+1} + (1 - \vartheta) [f]^s \right] \right)$$

siendo:

$[T]^{s+1}$  vector de temperaturas de los nodos  $1, \dots, n$  en el instante  $s+1$

$[T]^s$  vector de temperaturas de los nodos  $1, \dots, n$  en el instante  $s$

$[f]^{s+1}$  vector de fuerzas de los nodos  $1, \dots, n$  en el instante  $s+1$

$[f]^s$  vector de fuerzas de los nodos  $1, \dots, n$  en el instante  $s$

$\Delta t$  incremento temporal

$\vartheta$  coeficiente comprendido entre 0 y 1

## 4.4 MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN EN EL HORNO

### 4.4.1 Introducción

La transferencia de calor por radiación térmica implica el transporte de energía electromagnética desde una fuente a un sumidero y, a diferencia de otros modos de transferencia de calor, no necesita de un medio participante para propagarse. Otra diferencia es su dependencia de la cuarta potencia de la temperatura, por lo que se convierte en el modo dominante de transferencia de calor a altas temperaturas.

Cuando una onda electromagnética viaja a través de un medio (o en el vacío) y choca contra la superficie de otro medio, la onda puede reflejarse, total o parcialmente, y la parte no reflejada puede penetrar en el medio, atenuándose progresivamente. Si esta atenuación es completa, el material se denomina **opaco**, mientras que si la onda sale del medio sin atenuación se dice **transparente**. Una superficie opaca que no refleja radiación se denomina **superficie negra**. Una superficie negra no solo absorbe la máxima cantidad posible de energía radiativa sino que además emite la máxima cantidad de energía (Ley de Kirchhoff de la radiación térmica), por lo que nos va servir como referencia para clasificar los tipos de superficies atendiendo a su comportamiento radiativo.

Se denominará potencia emisiva,  $E$ , al flujo de calor radiativo emitido por una superficie. Para un cuerpo negro, la potencia emisiva viene dada por:

$$E_b(T) = n^2 \sigma T^4$$

donde  $n$  es el índice de refracción del medio, y  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann con valor  $5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ .

Se considerará una radiación que incide en un medio de cierto espesor, mostrado en la siguiente figura:

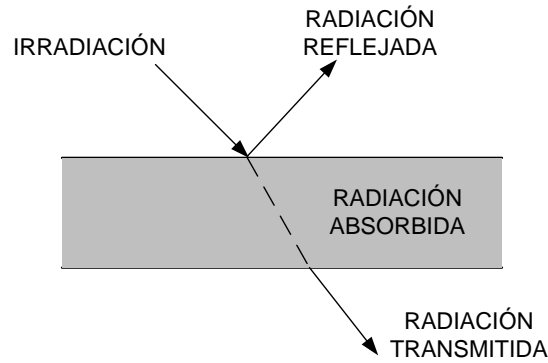


Ilustración 8: Radiación incidente en un medio de cierto espesor

A continuación, se definen las siguientes propiedades:

Reflectancia,  $\rho$ , como la relación entre la parte reflejada de la radiación incidente respecto a la radiación incidente total.

Absorbancia,  $\alpha$ , como la relación entre la parte absorbida de la radiación incidente respecto a la radiación incidente total.

Transmitancia,  $\tau$ , como la relación entre la parte transmitida de la radiación incidente respecto a la radiación incidente total.

Debe verificarse que  $\rho + \alpha + \tau = 1$ . Si el medio es opaco, entonces  $\rho + \alpha = 1$ .

Si el medio es un gas  $\alpha = 1 - \tau = 1$ . En este caso la transmitancia se va atenuando a medida que aumenta el espesor del medio según la relación:

$$\tau = e^{-KR}$$

donde  $K$  se denomina coeficiente de absorción del gas y  $R$  el espesor de la capa de gas.

Todas las superficies emiten radiación emisiva, alcanzando en los cuerpos negros su valor máximo. Por lo tanto, se definirá una cuarta propiedad:

Emisividad,  $\epsilon$ , como la relación entre energía emitida por una superficie respecto a la energía emitida por una superficie negra a la misma temperatura.

A continuación, se considerará el balance energético en una superficie, como la de la siguiente figura:

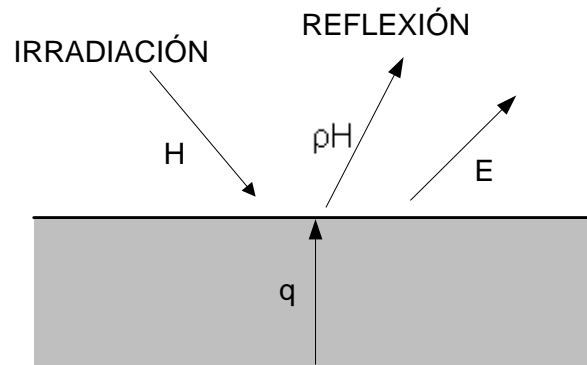


Ilustración 9: Balance energético en una superficie.

$$q = q_{\text{emitida}} - q_{\text{absorbido}} = E - \alpha H \quad [1]$$

donde  $q$  es el flujo de calor,  $E$  la potencia emitida y  $H$  la irradiación

$$\text{o también } q = q_{\text{salida}} - q_{\text{entrada}} = (q_{\text{emitida}} + q_{\text{reflejada}}) - q_{\text{irradiación}} = (E + \rho H) - H \quad [2]$$

Recordemos que si la superficie es opaca, entonces  $\rho = 1 - \alpha$

Para realizar un balance energético en una superficie, vamos a necesitar evaluar la irradiación  $H$  que tendrá contribuciones de todas las superficies visibles del recinto en que se encuentren. Para ello también necesitaremos determinar cuanta energía abandona una superficie arbitraria y viaja hacia otra, y para ello nos será muy útil el concepto de factor de vista entre dos superficies infinitesimales,  $dA_i$  y  $dA_j$ ,  $dF_{dA_i-dA_j}$  como la relación entre la energía radiativa difusa que abandona  $dA_i$  dirigida e interceptada por  $dA_j$  entre la energía difusa total que sale de  $dA_i$ .

$$dF_{dA_i-dA_j} = \frac{\cos \vartheta_i \cos \vartheta_j}{\pi R_{ij}^2} dA_j \quad [3]$$

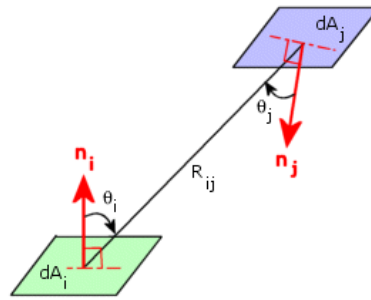


Ilustración 10: Factor de vista entre dos superficies infenitesimales.

De acuerdo a la Ley de Reciprocidad

$$dA_i dF_{dA_i dA_j} = dA_j dF_{dA_j dA_i} \quad [4]$$

El factor de vista desde la superficie  $A_j$  al diferencial de superficie  $dA_i$  es:

$$dF_{A_j-dA_i} = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} \frac{\cos \mathcal{G}_i \cos \mathcal{G}_j}{\pi R_{ij}^2} dA_j dA_i \quad [5]$$

Y como

$$A_j dF_{A_j-dA_i} = dA_i F_{dA_i-A_j}$$

entonces

$$F_{A_i-A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \mathcal{G}_i \cos \mathcal{G}_j}{\pi R_{ij}^2} dA_j dA_i \quad [6]$$

La Ley de Reciprocidad establece que

$$A_i F_{A_i-A_j} = A_j F_{A_j-A_i} \quad [7]$$

Finalmente, si consideramos un recinto formado por  $N$  superficies debe verificarse que:

$$\sum_{j=1}^N F_{di-j} = \sum_{j=1}^N F_{i-j} = 1 \quad [8]$$

INTERCAMBIO RADIATIVO ENTRE SUPERFICIES NEGRAS

Considérese un recinto de cualquier geometría formado por superficies negras. Para cada superficie, la emisividad  $\epsilon = 1$ , y la potencia emitida

$$Eb = \sigma T(r)^4$$

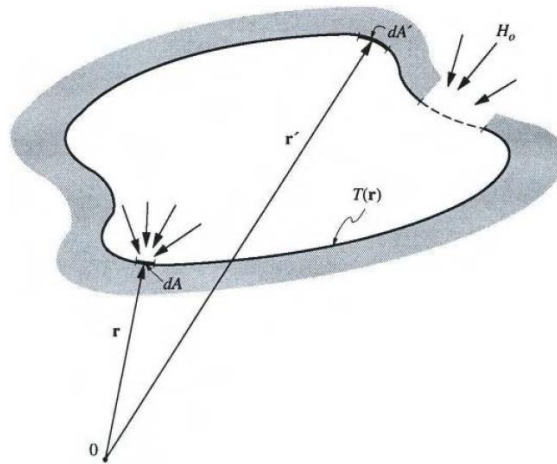


Ilustración 11: Recinto formado por superficies negras.

El balance energético para el diferencial de superficie  $dA$ , según [1] es:

$$q(r) = Eb(r) - H(r) \quad [9]$$

Donde  $H$ , como hemos visto, es la irradiación que llega a la superficie  $dA$

$$H(r) = \int_A Eb(r) \cdot dF_{dA-dA'} - H_o(r) \quad [10]$$

Se cumple entonces que

$$q(r) = Eb(r) - \int_A Eb(r) \cdot dF_{dA-dA'} - H_o(r) \quad [11]$$

Si el recinto se divide en  $N$  superficies isotermas:

$$q_i(r_i) = Eb_i - \sum_{j=1}^N Eb_j \int_{A_j} dF_{dA_i-dA_j} - H_o \quad [12]$$

Como

$$A_j dF_{A_j-dA_i} = dA_i F_{dA_i-A_j}$$

Entonces, de [5] se obtiene:

$$F_{dA_i-A_j} = \frac{A_j}{A_j dA_i} \int_{A_j} dF_{dA_j-dA_i} dA_i = \int_{A_j} dF_{dA_j-dA_i}$$

$$q_i(r_i) = Eb_i - \sum_{j=1}^N Eb_j \cdot F_{dA_i-A_j}(r_i) - H_{oi}(r_i) \quad [13]$$

Y el flujo en la superficie  $A_i$

$$q_i = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} q_i(r_i) \cdot dA_i = Eb_i - \sum_{j=1}^N Eb_j \cdot F_{i-j} - H_{oi} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad [14]$$

$$\text{Como } \int_{A_i} \sum_{j=1}^N F_{i-j} = 1$$

Entonces

$$q_i = \sum_{j=1}^N F_{i-j} (Eb_i - Eb_j) \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad [15]$$

### INTERCAMBIO RADIATIVO ENTRE SUPERFICIES GRISES Y DIFUSAS

Si las superficies son ahora grises se verifica que, para cada una de ellas,  
 $\varepsilon = \alpha = 1 - \rho$

Se definirá la radiosidad superficial como el flujo de calor que abandona una superficie:

$$J(r) = \varepsilon(r) Eb(r) + \rho(r) H(r) \quad [16]$$

De este modo, se verifica que el flujo en una superficie es:

$$q(r) = \varepsilon(r) Eb(r) - \alpha(r) H(r) \quad [17]$$

ó

$$q(r) = J(r) - H(r) \quad [18]$$

La irradiación procedente del resto de superficies del recinto se calcula ahora como:

$$H(r) = \int_A J(r') dF_{dA-dA'} + H_o(r) \quad [19]$$

A continuación:

$$q - \alpha q = \varepsilon Eb - \alpha H - \alpha(I - H) = \varepsilon Eb - \alpha H - \alpha J + \alpha H = \varepsilon Eb - \alpha J$$

$$(1 - \alpha)q = \varepsilon Eb - \alpha J$$

$$q(r) = \frac{\varepsilon(r)}{1 - \varepsilon(r)} [Eb(r) - J(r)] \quad [20]$$

De [18] y [19]

$$J(r) = q(r) + H(r) = q(r) + \int_A J(r') \cdot dF_{dA-dA'} \quad [21]$$

Y de [17] y [19]

$$q(r) = \varepsilon(r) \cdot Eb(r) - \alpha(r) \cdot \int_A J(r') \cdot dF_{dA-dA'} \quad [22]$$

De [20]

$$J(r) = Eb(r) - \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} - 1\right) \cdot q \quad [23]$$

De [22] y [23]

$$q(r) = \varepsilon(r) \cdot Eb(r) - \alpha(r) \int_A [Eb(r') - \left(\frac{1}{\varepsilon(r')} - 1\right) \cdot q] dF_{dA-dA'}$$

$$q(r) - \varepsilon(r) \cdot \int_A \left(\frac{1}{\varepsilon(r')} - 1\right) \cdot q(r') dF_{dA-dA'} = \varepsilon(r) \cdot Eb(r) - \alpha(r) \int_A Eb(r') \cdot dF_{dA-dA'}$$

Y de aquí ya podemos obtener la relación entre los flujos de calor en cada superficie gris del recinto en relación con las distintas potencias de emisión

$$\frac{q(r)}{\varepsilon(r)} - \int_A \left(\frac{1}{\varepsilon(r')} - 1\right) \cdot q(r') dF_{dA-dA'} = Eb(r) - \int_A Eb(r') \cdot dF_{dA-dA'} \quad [24]$$

### MÉTODO DE ZONAS

Se extenderá el método de obtención de los flujos de transferencia de calor radiativo en un recinto en el que, en principio, se parte de que no contiene un gas participante. **Se considerará inicialmente que el recinto está formado por N superficies negras.** El intercambio térmico radiativo entre dos superficies viene dado por:

$$Q_{i-j} = Q_{i-j} \cdot A_i = A_i \cdot F_{i-j} \cdot (Eb_i - Eb_j) = -Q_{j-i}, \text{ con } i, j = 1, 2, \dots, N [25]$$

Vamos a introducir aquí el concepto de factores de intercambio directo,  $s_i s_j$ , como

$$\overline{s_i s_j} = \overline{s_j s_i} = A_i F_{i-j} = A_j F_{j-i} = \int \int_{A_i A_j} \frac{\cos \vartheta_i \cos \vartheta_j}{\pi r_{ij}^2} dA_j dA_i \quad [26]$$

De modo que

$$Q_{i-j} = \overline{s_i s_j} \cdot (Eb_i - Eb_j) \quad [27]$$

Estos factores tienen dimensión de área a diferencia de los factores de forma que eran adimensionales. En un recinto de N superficies negras deben verificarse

$$\sum_{j=1}^N \overline{s_i s_j} = A_i \quad [28]$$

Sumando todas las contribuciones de transferencia de calor radiativo a la superficie  $A_i$ .

$$Q_i = A_i q_i = \sum_{j=1}^N \overline{s_i s_j} (Eb_i - Eb_j) = A_i Eb_i - \sum_{j=1}^N \overline{s_i s_j} Eb_j \quad [29]$$



Si se considera ahora un recinto formado por  $N$  superficies grises, el intercambio térmico radiativo entre dos superficies viene dado por

$$Q_{ij} = -Q_{ji} = \overline{s_i s_j} (J_i - J_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad [30]$$

Y el flujo neto en la superficie  $i$  será:

$$Q_i = A_i q_i = A_i (J_i - H_i) = A_i J_i - \sum_{j=1}^N \overline{s_i s_j} \cdot J_j \quad j = 1, 2, \dots, N \quad [31]$$

De esta expresión, junto con [20], obtenemos que

$$J_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \cdot q_i - Eb_i \quad [32]$$

y

$$\begin{aligned} A_i \cdot q_i &= A_i \left( \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} q_i - Eb_i \right) - \sum_{j=1}^N \overline{s_i s_j} \left( \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} q_j - Eb_j \right) \\ A_i \cdot q_i - \sum_{j=1}^N \overline{s_i s_j} \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} q_j - A_i \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} q_i &= A_i Eb_i + \sum_{j=1}^N \overline{s_i s_j} Eb_j \\ \sum_{j=1}^N \left( \frac{A_j \delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \cdot \overline{s_i s_j} \right) q_j &= \sum_{j=1}^N (A_j s_{ij} - \overline{s_i s_j}) Eb_j \quad i = 1, 2, \dots, N \quad [32] \end{aligned}$$

donde  $\delta_{ij}$  es la función delta de Kronecker, que vale 1 si  $i = j$ , y 0 en caso contrario.

Si se considera que el recinto está relleno de un gas gris absorbente y emite, con un coeficiente de absorción  $K$  constante, el intercambio térmico entre dos superficies vendrá dado por:

$$Q_{ij} = \overline{s_i s_j} \cdot J_i \quad \text{con} \quad \overline{s_i s_j} = \iint_{A_i A_j} e^{-ks} \cdot \frac{\cos \vartheta_i \cos \vartheta_j}{\pi s_{ij}^2} dA_j dA_i \quad [33]$$

El intercambio térmico entre superficie y volumen será:

$$Q_{ij} = \overline{g_i s_j} \cdot Eb_i \quad \text{con} \quad \overline{s_i s_j} = \iint_{V_i A_j} e^{-ks} \cdot \frac{\cos \vartheta_j}{\pi s_{ij}^2} \cdot k \cdot dA_j dV_i \quad [34]$$

Y el intercambio volumen-volumen:

$$Q_{ij} = \overline{g_i g_j} \cdot Eb_i \quad \text{con} \quad \overline{g_i g_j} = \iint_{V_i V_j} e^{-ks} \cdot \frac{k^2}{\pi s_{ij}^2} dV_j dV_i$$

Debe verificarse que:

$$\overline{s_i s_j} = \overline{s_j s_i} \quad [35]$$

$$\overline{g_i s_j} = \overline{s_j g_i} \quad [36]$$

$$\overline{g_i g_j} = \overline{g_j g_i} \quad [37]$$

Si se considera ahora un recinto formado por  $N$  superficies grises isotermas y  $M$  volúmenes de gas gris isoterma, el flujo de calor radiativo neto en la superficie  $i$  será:

$$\begin{aligned} Q_{si} &= A_i \cdot q_i = A_i (J_i - H_{si}) = A_i \cdot \varepsilon_i \cdot (Eb_{si} - H_{si}) = \\ &= \sum_{j=1}^N \overline{s_j s_i} \cdot (J_i - J_j) + \sum_{k=1}^M \overline{g_k s_i} \cdot (J_i - Eb_{gk}) = \\ &= \varepsilon_i \cdot (A_i \cdot Eb_{si} - \sum_{j=1}^N \overline{s_j s_i} \cdot J_j - \sum_{k=1}^M \overline{g_k s_i} \cdot Eb_{gk}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad [38] \end{aligned}$$

$$\text{Debiendo verificarse que } \sum_{j=1}^N \overline{s_j s_i} + \sum_{k=1}^M \overline{g_k s_i} = A_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad [39]$$

Y el flujo de calor radiativo neto en el volumen  $g_i$  será:

$$\begin{aligned} Q_{gi} &= K V_i (4Eb_{gi} - G_i) = \sum_{j=1}^N \overline{s_j g_i} (Eb_{gi} - J_j) + \sum_{k=1}^M \overline{g_k g_i} (Eb_{gi} - Eb_{gk}) = \\ &= 4K V_i Eb_{gi} - \sum_{j=1}^N \overline{s_j s_i} \cdot J_j - \sum_{k=1}^M \overline{g_k s_i} Eb_{gk} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad [40] \end{aligned}$$

Debiendo verificarse que:

$$\sum_{j=1}^N \overline{s_j g_i} + \sum_{k=1}^M \overline{g_k g_i} = 4K V_i \quad i = 1, 2, \dots, M \quad [41]$$

#### 4.4.2. Modelo térmico de transferencia de calor en el horno

Tal y como se mencionó en el apartado xx, nuestro horno estaba dividido en tres zonas, y para cada una de ellas se distingue una parte superior y otra inferior separada por el manto de palanquillas. Para resolver la transferencia de calor por radiación que se produce en el horno vamos a realizar una serie de aproximaciones necesarias dadas las lecturas de temperaturas que tenemos disponibles que nos debe conducir a un sistema de tantas ecuaciones como incógnitas:

- No se produce intercambio térmico entre las partes superior e inferior, pero sí entre zonas. Así que vamos a dividir el horno completo en dos partes aisladas entre sí, superior e inferior.
- Se considerará que solo tres paredes isotermas en cada una de estas partes irradia calor al gas del horno y a las palanquillas. Estas tres paredes son los techos de precalentamiento, calentamiento e igualación en la parte superior, o las soleras de precalentamiento, calentamiento e igualación en la inferior. Consideraremos a estas paredes refractarias, es decir con un flujo neto de calor nulo. Las paredes laterales no participarían en el intercambio térmico.
- El volumen del gas en cada parte, superior e inferior, se va a trocear en 56 volúmenes isotermos con un espesor de 0,26 metros, altura la de parte correspondiente del horno y anchura la del horno. De solo tres de estos volúmenes (en precalentamiento, calentamiento e igualación) conocemos la temperatura, y consiguientemente la potencia emisiva radiativa, ya que en cada uno ellos se sitúa un termopar.
- La superficie constituida por las palanquillas se va a trocear también en 56 superficies sumidero, también con longitud 0.26 metros y anchura la del horno.
- Se estimará que cada porción de gas isotermo recibe calor de las tres paredes fuente refractarias y del resto de porciones de gas del horno, pero despreciaremos la aportación de las palanquillas. Esta interacción se considera en equilibrio térmico.
- Se considerará, finalmente, que cada superficie isoterma sumidero recibe calor de las tres superficies fuente refractarias y de cada uno de los volúmenes de gas isotermos.

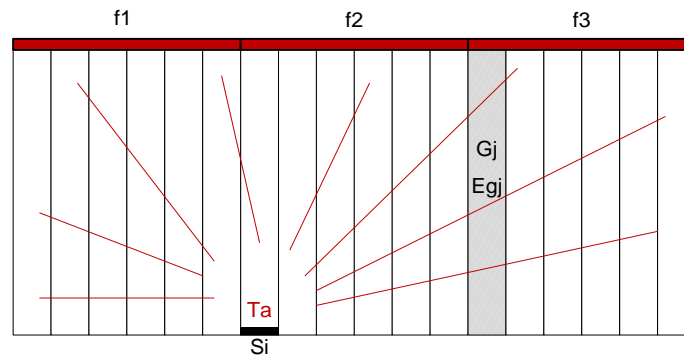


Ilustración 12: División en zonas de las superficies y volúmenes del horno.

Se denominará:

$f_i g_j$  al factor de intercambio directo entre la superficie fuente refractaria  $i$  y el volumen de gas isoterma  $j$

$g_i g_j$  al factor de intercambio directo entre el volumen de gas isoterma  $i$  y el de  $j$

$s_i f_j$  al factor de intercambio directo entre la superficie sumidero  $i$  y la superficie fuente refractaria  $j$

$s_i f_j$  al factor de intercambio directo entre la superficie sumidero  $i$  y el volumen de gas isoterma  $j$

Sea

$[fg]$  la matriz con dimensión  $56 \times 3$  con los factores  $f_i g_j$

$[gg]$  la matriz con dimensión  $56 \times 56$  con los factores  $g_i g_j$

$[4KV]$  una matriz diagonal  $56 \times 56$  en la que cada valor en la diagonal contiene el producto  $4 K V_i$ , siendo  $V_i$  el volumen del elemento de gas isoterma anteriormente definido

$[Eg]$  el vector columna de las 56 potencias radiativas de cada volumen de gas

$[J]$  el vector columna de las 3 radiosidades de las paredes fuente refractarias

El intercambio de calor con los volúmenes de gas está en equilibrio térmico, es decir

$$[4KV][E_g] - [fg][J] - [gg][E_g] = [0] \quad [1]$$

De aquí se extraerá la parte de los volúmenes de gas cuyas potencias emisivas radiativas conocemos gracias a la medida de sus termopares. Sea

$[fg_{TC}]$  la matriz con dimensión  $3 \times 3$  con los factores  $f_i g_j$  que afectan a los tres volúmenes con temperatura conocida.

$[g_{TC}g]$  la matriz con dimensión  $3 \times 56$  con los factores  $g_i g_j$  que relacionan los tres volúmenes con temperatura conocida con el resto

$[4KV_{TC}]$  una matriz diagonal 3x3 en la que cada valor en la diagonal contiene el producto  $4 K V_i$

$[E_{gTC}]$  el vector columna de las 56 potencias radiativas de cada volumen de gas

$$[4KV_{TC}][E_{gTC}] - [\overline{fg}_{TC}][J] - [\overline{g}_{TC}g][E_g] = [0] \quad [2]$$

De [1] vamos a despejar  $[E_g]$

$$[E_g] = [[4KV] - [\overline{gg}]^{-1} [\overline{fg}]] [J] \quad [3]$$

Vamos a sustituir este valor en [2] y despejar  $[J]$  en función de  $[E_{gTC}]$

$$[4KV_{TC}][E_{gTC}] = [[\overline{fg}_{TC}] - [\overline{g}_{TC}g][[4KV] - [\overline{gg}]^{-1} [\overline{fg}]]][J]$$

Sea

$$[R] = [[\overline{fg}_{TC}] - [\overline{g}_{TC}g][[4KV] - [\overline{gg}]^{-1} [\overline{fg}]]] \quad [4]$$

Entonces

$$[J] = [R]^{-1} [4KV_{TC}][E_{gTC}] \quad [5]$$

Y ahora obtener la distribución de potencias de los gases en función de las conocidas

$$[E_g] = [[4KV] - [\overline{gg}]^{-1} [\overline{fg}]] [R]^{-1} [4KV_{TC}][E_{gTC}] \quad [6]$$

Para cada superficie sumidero  $i$

$$Q_i = \varepsilon_i \cdot A_i \cdot Eb_i - \varepsilon_i ([s_i f] \cdot [J] + [s_i g] \cdot [E_g]) \quad [7]$$

Donde

$[s_i f]$  la matriz con dimensión 1x3 con los factores  $s_i f_j$

$[s_i g]$  la matriz con dimensión 1x56 con los factores  $s_i g_j$

Como

$$Q_i = q_i \cdot A_i$$

$$q_i = \varepsilon_i \cdot Eb_i - \frac{\varepsilon_i}{A_i} ([s_i f] \cdot [J] + [s_i g] \cdot [E_g])$$

Para poder utilizar este flujo radiativo por unidad de superficie recibido por cada palanquilla en el modelo de transferencia de calor por conducción en una palanquilla por elementos finitos descrito en un capítulo anterior, vamos a definir una temperatura ambiente ficticia que produciría en la palanquilla el mismo flujo térmico radiativo.

$$q_i = \frac{\varepsilon_i}{A_i} ([s_i f] \cdot [J] + [s_i g] \cdot [E_g]) = \varepsilon_i \sigma T_a$$

$$\text{Finalmente, } T_a^4 = \frac{([s_i f] \cdot [J] + [s_i g] \cdot [E_g])}{A_i \cdot \sigma}$$

#### 4.5 OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL GAS A PARTIR DEL TERMOPAR

Las temperaturas de gas en las zonas de calentamiento e igualación, superior e inferior, se han obtenido a partir de termopares tipo S. Sin embargo, el termopar no está proporcionando directamente una indicación de la temperatura del gas que lo rodea, sino de la cabeza del termopar, así que tenemos que realizar algunas correcciones. Suponiendo que la cabeza del termopar está en equilibrio se verifica que:

$$Q_{convección} = Q_{radiación}$$

$$h A_t (T_{gas} - T_t) = A_t \sigma \epsilon_t (T_t^4 - T_{pared}^4)$$

donde  $A_t$  es el área de la cabeza del termopar,  $T_t$  su temperatura,  $\epsilon_t$  la emisividad del termopar y  $h$  el coeficiente de convección.

Si se supone que se puede despreciar la transferencia de calor por radiación a la cabeza, entonces la diferencia de temperatura del gas respecto a la indicada por el termopar vendrá dada por:

$$\Delta T = T_{gas} - T_t = \frac{\sigma \epsilon_t T_t^4}{h}$$

El coeficiente de convección viene dado por

$$h = \frac{Nu k_{gas}}{D_t}$$

donde  $k_{gas}$  es la conductividad térmica del gas y  $D_t$  su diámetro que en nuestro caso es de 0.5 mm.

El número de Nusselt se calcula:

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

## 4.6 GENERACIÓN DE HISTÓRICOS

La implementación de los anteriormente citados modelos de transferencia de calor nos permitirá conocer el valor de la temperatura en cualquier punto de las palanquillas que se encuentren en el interior del horno.

Se trata, ahora, de ir registrando cada cierto periodo de tiempo dichos valores.

Actualmente, sólo se registran los valores de temperatura de la cara superior, inferior y el corazón de la palanquilla. El periodo de muestro que se ha establecido es de sesenta segundos.

Habrán tantos ficheros como palanquillas haya en el horno. Es decir, habrá un fichero para cada palanquilla cuyo nombre se corresponderá con el identificador de la respectiva palanquilla.

Los campos por los que estarán compuestos los ficheros serán: fecha, hora, consigna de temperatura superior, consigna de temperatura inferior, valor de temperatura en la cara superior, valor de temperatura en la cara inferior y valor de temperatura en el corazón. Tanto los valores de consigna como los de temperatura de las palanquillas estarán expresados en °C.

Una vez la palanquilla haya salido del horno, se podrán consultar y graficar los valores que hemos ido calculando y registrando para poder chequear el comportamiento, en cuanto al calentamiento, que ha sufrido la palanquilla durante su paso por el horno.

## 4.7 MANUAL DEL PROGRAMADOR

### 4.7.1 Identificación del proyecto

El proyecto es una aplicación de JavaFX.

Junto a la documentación del trabajo, se adjunta una carpeta denominada "HOT" que contiene el programa en Java del proyecto. Por cuestiones de confidencialidad, no se ha añadido la carpeta de librerías al proyecto.

### 4.7.2 Versión NetBeans

La versión es NetBeans 8.0.2

### 4.7.3 Principales algoritmos de implementación

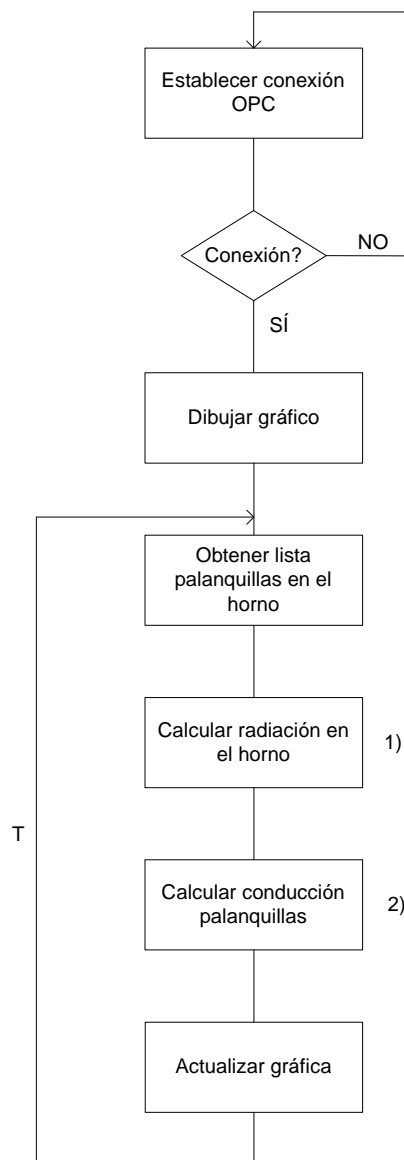


Ilustración 13: Algoritmo de funcionamiento principal.



1)

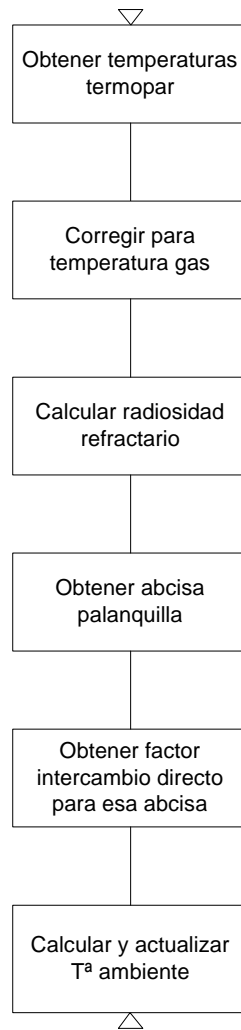


Ilustración 14: Algoritmo de implementación modelo de radiación en el horno.

2)

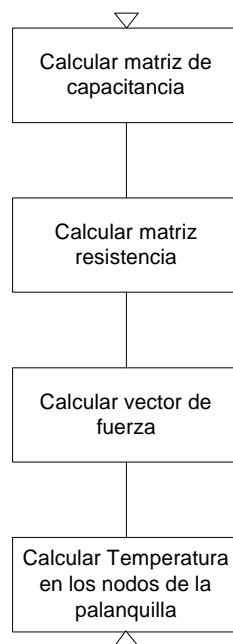


Ilustración 15: Algoritmo implementación modelo de transferencia de calor por conducción.

#### 4.7.4 Organización del programa de control

Se ha realizado una programación orientada a objetos. Por ello, el programa está organizado en clases y cada clase tiene sus atributos y métodos correspondientes.

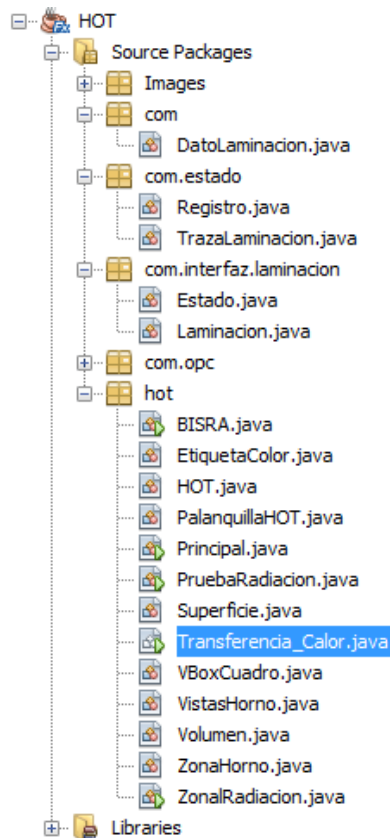


Ilustración 16: Módulos del programa de control.

Para la documentación de las clases se ha utilizado una herramienta de Java: Javadoc.

Javadoc es una utilidad de Oracle para la generación de documentación de APIs en formato HTML a partir de código fuente en Java. Es el estándar de la industria para documentar clases de Java. Este sistema consiste en incluir comentarios en el código, utilizando unas etiquetas especiales, que después pueden procesarse y generar un juego navegable de documento HTML que permita analizar la estructura de una aplicación Java. Estos comentarios están incluidos en bloques entre las etiquetas `/**` y `*/` tal y como se muestra en la siguiente imagen.

```
/**
 * Dimensión de la palanquilla.
 */
private double dim;
/**
 * Coeficiente de convección.
 * Se trata de un array de cuatro elementos que se corresponden con el
 * coeficiente del convección en la cara superior e inferior
 * y en los laterales derecho e izquierdo de la palanquilla.
 */
public double hc[];

/**
 * Constructor de Transferencia de Calor
 * @param codigoBisra Código BISRA de la palanquilla
 * @param num_col Número de columnas de la malla
 * @param num_fil Número de filas de la malla
 * @param dim Dimensión de la palanquilla
 * @param hc Array con los respectivos coeficientes de convección
 * @param incrementoTiempo Periodo de muestreo
 */
public Transferencia_Calor(int codigoBisra, int num_col, int num_fil, double dim, double hc[],
double incrementoTiempo)
{
    this.codigoBisra = codigoBisra;
    this.num_col = num_col;
    this.num_fil = num_fil;
    this.hc = hc;
}
```

Ilustración 17: Formato de los comentarios de atributos y métodos en Java para la generación del documento HTML.

De este modo, se ha generado un archivo en formato HTML que se adjunta a la memoria, y que está incluido dentro de la carpeta Javadoc, “*index.HTML*”, donde aparecen todas las clases del proyecto con sus correspondientes métodos y atributos documentados.

## 5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se muestran en las imágenes 13, 14 y 15.

La ilustración 13 representa un interfaz de seguimiento de las palanquillas en el horno. Se puede observar una vista de perfil (arriba) y otra de planta (abajo) del horno de termodifusión de Roldán. Así mismo, aparecen las palanquillas en la posición que ocupan en el interior del horno. También aparecen unos campos de texto que informan al usuario de valores tales como la consigna de temperatura, la temperatura medida por los termopares, caudal de gas, etc...

Cada minuto se actualiza el interfaz de modo que si ha habido algún cambio (por ejemplo, entre una nueva palanquilla o avanzan las ya existentes y, por consiguiente, cambian su posición en horno), éste aparezca reflejado en pantalla.

Las palanquillas están caracterizadas, entre otras cosas, por su longitud, anchura, peso y tipo de acero. Si se desea consultar las propiedades de una palanquilla basta con posicionarse encima de ella y pulsar con el botón izquierdo del ratón. De este modo, y tal como se muestra en la ilustración 14, aparecerá un cuadro de diálogo en el que, además de las características anteriormente citadas, se mostrarán datos de especial interés como la temperatura de la cara superior, de la cara inferior y la del corazón de la palanquilla en ese momento.

Por último, en la ilustración 15 se muestra una gráfica con los valores de temperatura que ha ido alcanzando la palanquilla desde que entra hasta que sale del horno. Se hace una comparativa entre los valores calculados según el modelo de transferencia de calor desarrollado en este proyecto (líneas de trazo grueso) con los valores que nos facilita el HOT (líneas de trazo fino).

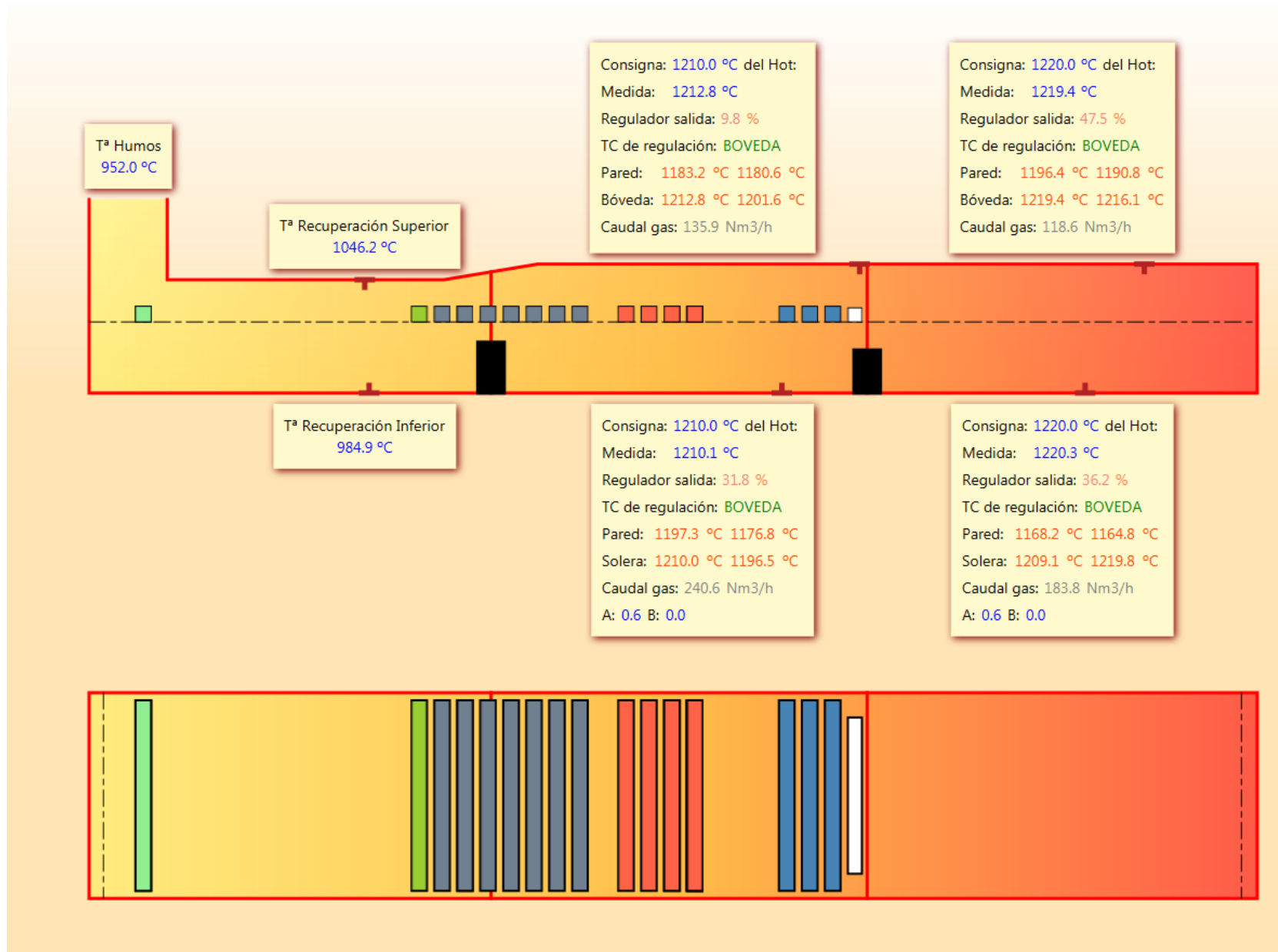


Ilustración 18: Interfaz de usuario del horno.

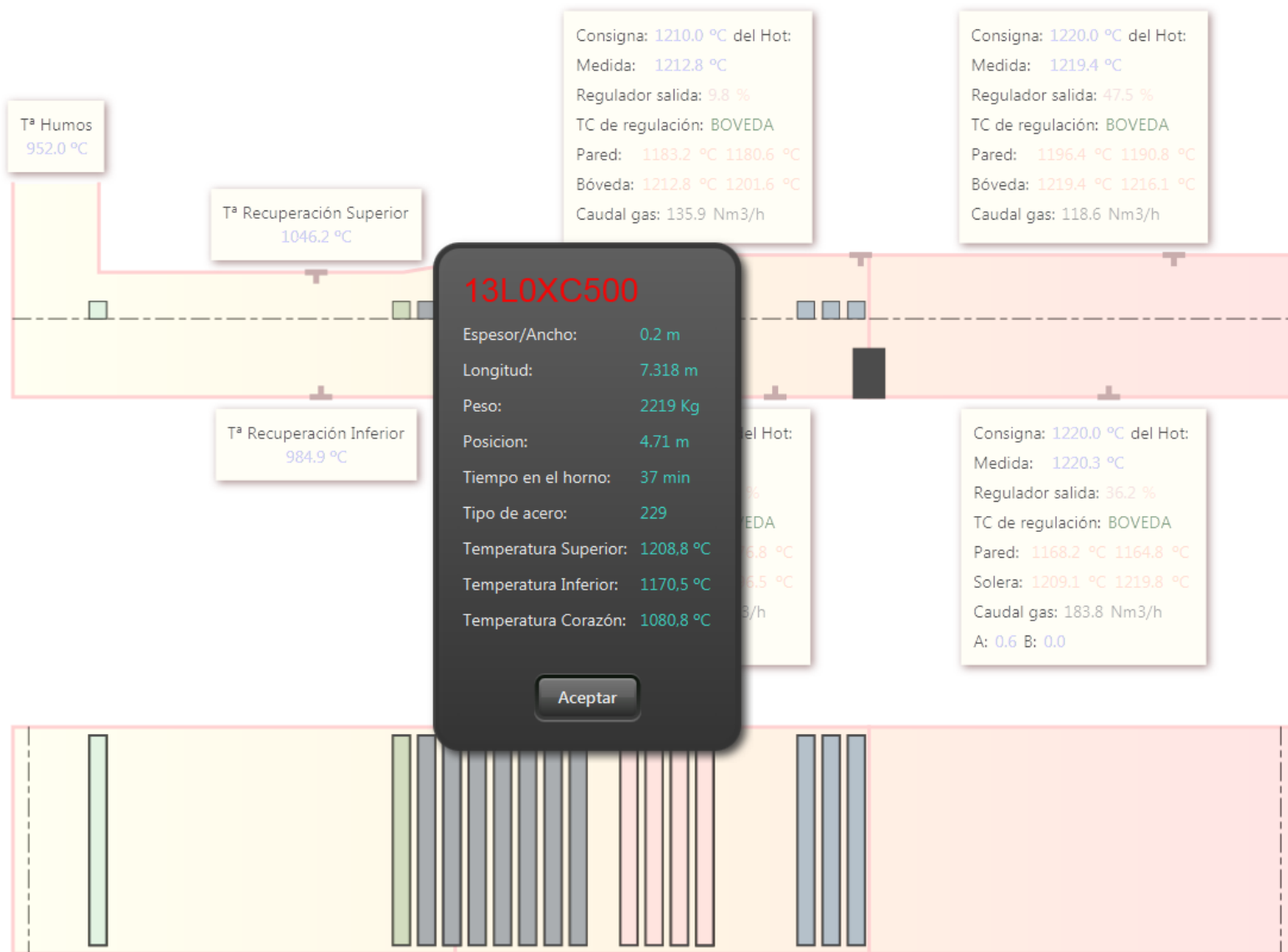


Ilustración 19: Cuadro de diálogo con información de las palanquillas.

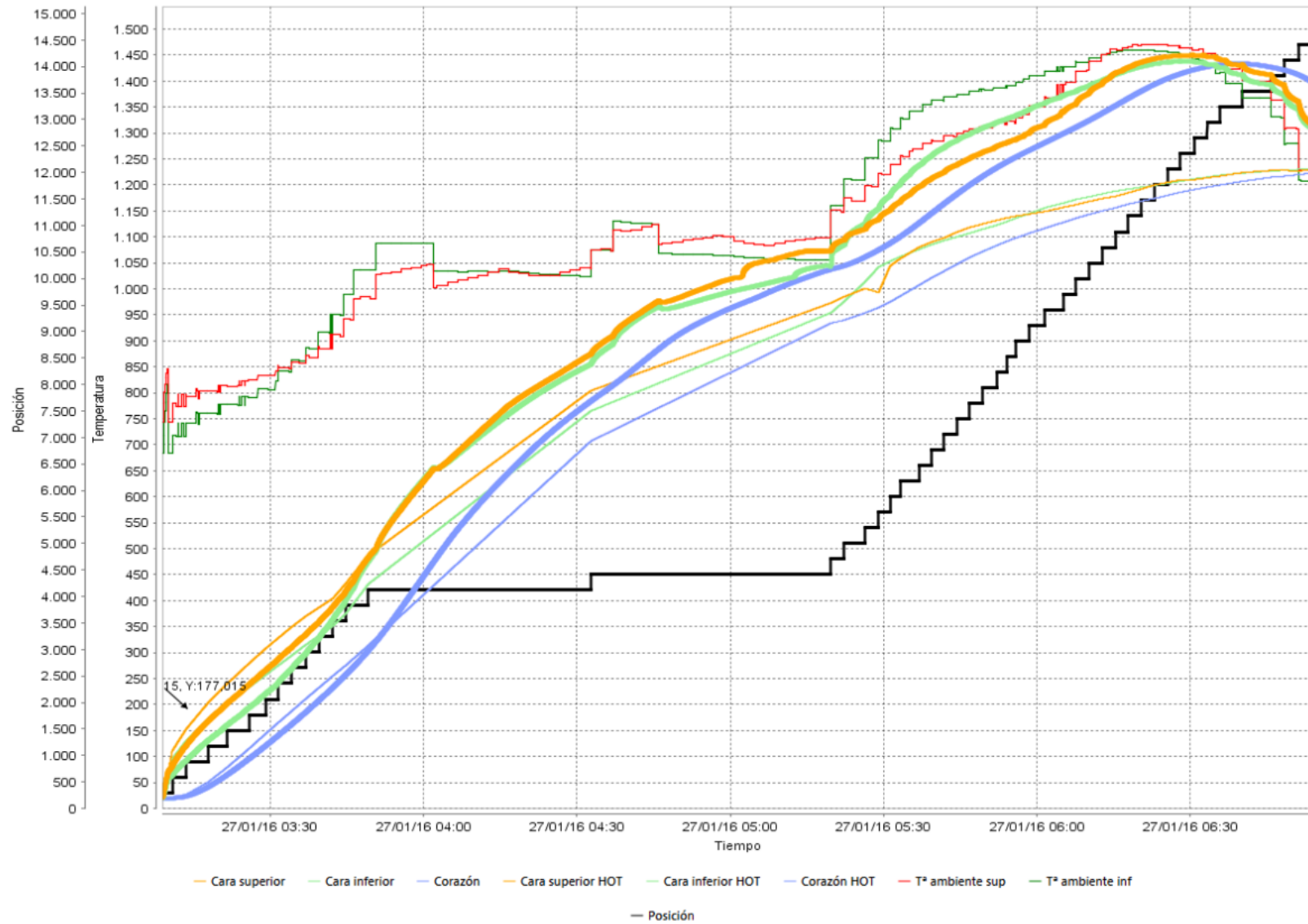


Ilustración 20: Gráfico con los valores la temperatura de una palanquilla. En trazo fino, resultados según el modelo del HOT. En trazo grueso, resultados según el modelo implementado en el proyecto. En negro posición de la palanquilla en el horno.

## 6. CONCLUSIONES

Se ha realizado un correcto seguimiento de las palanquillas en el horno y se han ido calculando y registrando las temperaturas para cada una de las palanquillas desde que entran hasta que salen del horno. Sin embargo, como se observa en la ilustración 15, el modelo implementado en este proyecto difiere en gran medida de los resultados obtenidos con el modelo térmico del HOT.

Si bien el modelo del HOT no debe considerarse necesariamente como un modelo de referencia que refleje con total exactitud el comportamiento térmico real de las palanquillas en el horno, los resultados obtenidos con la implementación del modelo aquí presentado son, en cierta medida, un tanto anómalos y, por consiguiente, obligan a una revisión. No sólo la temperatura estimada es demasiado elevada, sino que además lo más llamativo es que se produce una concavidad y descenso de la temperatura en la zona final de igualación lo cual, no tiene sentido físico.

La causa probable es que las aproximaciones que hemos supuesto en el apartado 4.4 no son adecuadas, especialmente, en lo que se refiere a considerar tres paredes refractarias isotermas que determinan el perfil de la temperatura del gas en el horno. En este contexto, se abrirán nuevas líneas de investigación que giren en torno al modelo de transferencia por radiación ya desarrollado pero que partan de otros supuestos.



## 7. BIBLIOGRAGÍA

### 7.1 LIBROS

- W. Lewis, Perumal Nithiarasu, Kankanhaly N. Seetharamu, “*Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*”, Wiley.
- Michael F. Modest, “*Radiative Heat Transfer*”, Academic Press
- Jonhn Zukowski, “*Programación Java 2*”, Anaya.
- Wolfgang Mahnke, Stefan-Helmut Leitner, Mattias Damm, “*OPC Unified Architecture*”, Springer.

### 7.2 ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

- Aaron D. Lewis, “*Sawdust pyrolysis and petroleum coke CO<sub>2</sub> gasification at high heating rates*”
- Man Young Kim, “*A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace*”
- Yu Jing Jang, Sang Woo Kim, “*An Estimation of a Billet Temperature during Reheating Furnace Operation*”
- Zongyu Li, “*Computer Simulation of the push-type slab Reheating Furnace*”.

### 7.3 PÁGINAS WEB

- JavaFX, Oracle documentation <http://docs.oracle.com/javase/8/javase-clienttechnologies.htm>
- Transferencia de calor [https://es.wikipedia.org/wiki/Transferencia\\_de\\_calor](https://es.wikipedia.org/wiki/Transferencia_de_calor)
- Arquitectura OPC UA <https://opcfoundation.org/>

# APÉNDICE

## 1. INTRODUCCIÓN OPC

OPC (OLE for Process Control) lo desarrolló en 1996 el sector de la automatización como una especificación normalizada que permitiría la interconectividad de sistemas en el campo del control y supervisión de procesos industriales, basado en una tecnología Microsoft, que proporciona una interfaz común para las comunicaciones entre diferentes productos de distintos proveedores. Los sistemas de control de procesos deben poder comunicarse con todos estos productos, acceder a los datos o permitir el acceso a los datos por medio de una plataforma común de comunicaciones. La comunicación OPC se realiza a través de una arquitectura Cliente-servidor. El servidor OPC es la fuente de datos y cualquier aplicación basada en OPC puede acceder a dicho servidor para leer/escribir cualquier variable que ofrezca el servidor

La Fundación OPC se creó para mantener la norma, y desde entonces ha supervisado la introducción de una serie de especificaciones de normas (como el acceso a datos OPC).

La OPC clásica proporciona las especificaciones estándar para el acceso de datos (DA), el acceso de datos históricos (HDA), las alarmas y los sucesos (A&E). Estas especificaciones OPC están ampliamente aceptadas en el sector de la automatización. Dichas especificaciones se pueden descargar y consultar en mayor detalle desde la página web de la OPC Foundation.

El sistema OPC clásico, que se basa en la antigua tecnología COM/DCOM de Microsoft, ha llevado al desarrollo de nuevas especificaciones conocidas como OPC UA (arquitectura unificada).

En la actualidad, la Fundación OPC afirma que OPC UA ya no son las siglas de OLE para control de procesos, sino que OPC UA son las siglas de OPen Connectivity- Unified Architecture (arquitectura unificada conectividad abierta).

## 2. OPC Clásico

Las especificaciones del OPC clásico se basan en la tecnología COM / DCOM (Distributed Component Object Model) de Microsoft Windows para el intercambio de datos entre los componentes de software. Principalmente, han sido desarrolladas tres especificaciones OPC:

- Acceso de datos de proceso (DA)
- Alarmas y eventos (A & E)
- Acceso a datos históricos (HAD)

El acceso a los datos de proceso se describe en la especificación DA, A & E describe una interfaz para la información basada en eventos, incluyendo el reconocimiento de las alarmas de proceso, y HDA describe funciones para acceder a los datos archivados.

Todas las interfaces ofrecen una manera de navegar a través del espacio de direcciones y proporcionan información acerca de los datos disponibles. OPC utiliza un enfoque de cliente-servidor para el intercambio de información.

Un servidor OPC encapsula la fuente de información del proceso como un dispositivo y hace que la información esté disponible a través de su interfaz. Un cliente OPC se conecta al servidor OPC y puede acceder y leer los datos ofrecidos.

Las aplicaciones que manejan y que proporcionan datos pueden ser a la vez cliente y servidor.

La siguiente ilustración muestra un caso de uso típico de los clientes y servidores OPC.

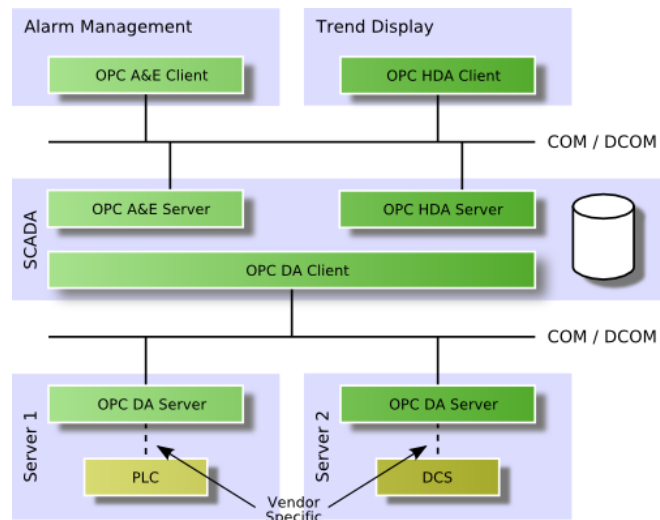


Ilustración 1: Típico caso de uso de clientes y servidores OPC.

Como ya se mencionó, las interfaces del OPC clásico se basan en la tecnología COM y DCOM de Microsoft.

Por un lado, la ventaja de este enfoque fue la reducción del trabajo de especificación para la definición de diferentes APIs para diferentes necesidades sin la obligación de tener que definir un protocolo de red o un mecanismo de interproceso de communication.

COM y DCOM proporcionan un mecanismo transparente para un cliente a la hora de llamar a métodos de un *COM-object* en un servidor que se está ejecutando en el mismo proceso, en otro proceso, o en otro nodo de la red. El uso de esta tecnología está disponible en todos los PCs basados en un sistema operativo de Windows.

En cambio, las dos principales desventajas son:

- La dependencia de una plataforma Windows
- Los problemas de DCOM al utilizar la comunicación remota con OPC. DCOM es difícil de configurar, tiene tiempos de espera muy largos y no configurables, y no puede ser utilizado para la comunicación de Internet.

## 2.1 ACCESO DE DATOS OPC

La interfaz OPC para el acceso de datos permite la lectura, la escritura y la vigilancia de las variables que contienen los datos actuales del proceso.

El uso principal consiste en transportar datos en tiempo real desde los PLC , DCS , y otros dispositivos de control a los HMI y a otros clientes de visualización .

Los clientes OPC DA seleccionan explícitamente las variables (ítems OPC) que quieren leer y/o escribir en el servidor. El cliente OPC establece una conexión con el servidor mediante la creación de un objeto *OPCServer*.

El *OPCServer* ofrece métodos para navegar por la jerarquía del espacio de direcciones para buscar elementos y sus propiedades como, por ejemplo, el tipo de datos y los derechos de acceso.

Para acceder a los datos, el cliente agrupa las variables OPC con idéntica configuración, como por ejemplo el tiempo de actualización, en un objeto *OPCGroup* .

La siguiente imagen representa los diferentes objetos que el cliente OPC crea en el servidor.

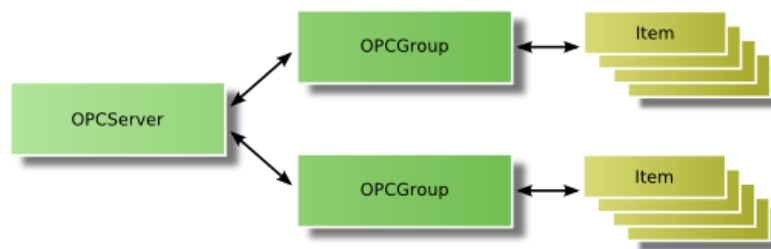


Ilustración 2: Objetos creados por un cliente OPC de acceso de datos.

Cuando se añade a un grupo, las variables de proceso pueden ser leídas o escritas por el cliente.

Sin embargo, la forma más recomendada para la lectura de datos por parte del cliente es monitorizando los cambios de valor en el servidor. De esta forma, el cliente define una tasa de actualización en el grupo que contenga los elementos de interés. La velocidad de actualización se utiliza en el servidor para comprobar cíclicamente los valores que puedan cambiar. Después de cada ciclo, el servidor envía al cliente sólo aquellos valores que se han modificado.

OPC proporciona datos en tiempo real que no pueden ser accesibles de forma permanente, por ejemplo, cuando la comunicación con un dispositivo se interrumpe

temporalmente. La tecnología del OPC clásico maneja este problema proporcionando una marca de tiempo y la calidad de los datos entregados.

La calidad especifica si los datos son exactos (buena), o no están disponibles (malo) o son desconocidos (incierto).

## **2.2 ALARMA Y EVENTOS OPC**

La interfaz OPC-A & E permite la recepción de las notificaciones de eventos y de alarma.

Los eventos son notificaciones individuales para informar al cliente acerca de la ocurrencia de un evento. Las alarmas son notificaciones que informan al cliente sobre el cambio de una condición en el proceso. Tal condición puede ser el nivel de un tanque. En este ejemplo, un cambio de condición puede ocurrir cuando se excede un nivel máximo o ha caído por debajo de un nivel mínimo. Muchas alarmas incluyen el requisito de que la alarma tiene que ser reconocida. Este reconocimiento también es posible a través de la interfaz OPC-A & E.

De este modo, OPC-A & E proporciona una interfaz flexible para la transmisión de alarmas y eventos de proceso a partir de diferentes fuentes de eventos.

Para recibir notificaciones, el cliente OPC-A & E se conecta al servidor, se suscribe para recibir notificaciones, y éste recibe todas las notificaciones que se activan en el servidor. Para limitar el número de notificaciones, el cliente OPC puede especificar ciertos criterios de filtro.

En primer lugar, el cliente OPC se conecta mediante la creación de un objeto OPCEventServer en el servidor A & E y, a continuación, mediante la generación de una suscripción OPCEvent recibe los mensajes de eventos.

Los filtros para estos mensajes de eventos se pueden configurar por separado para cada suscripción.

La siguiente ilustración muestra los diferentes objetos que el cliente OPC crea en el servidor.

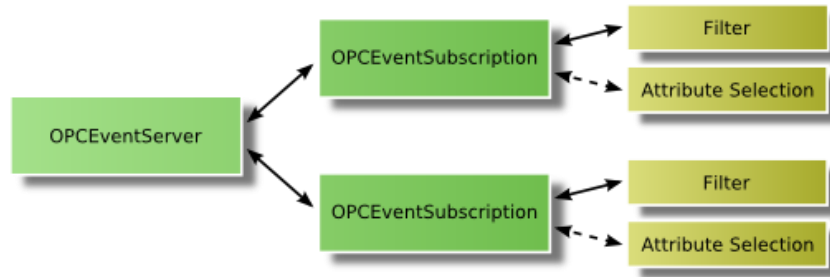


Ilustración 3: Objetos creados por un cliente OPC de recepción de eventos.

A diferencia del OPC-DA, no hay una petición explícita para obtener información específica, como los valores de lectura; Sin embargo, todos los eventos de proceso se suministran y el cliente puede limitar la cantidad de los eventos mediante el establecimiento de ciertos criterios de filtro, por ejemplo, filtrar por tipos de eventos, por orden de prioridad, o por origen del evento.



### 2.3 ACCESO OPC HISTORIAL DE DATOS

Donde OPC Data Access permite el acceso en tiempo real a variables de proceso que cambian continuamente, el acceso a historiales de datos OPC proporciona acceso a datos de proceso ya almacenados. Desde un simple sistema de registro de datos en serie a un sistema SCADA complejo, los archivos históricos se pueden recuperar de una manera uniforme.

El cliente OPC se conecta mediante la creación de un objeto OPCHDAServer en el servidor de HDA. Este objeto ofrece todas las interfaces y métodos para leer y actualizar los datos históricos. Se define un segundo objeto como OPCHDABrowser para navegar por el espacio de direcciones del servidor HDA.

La funcionalidad principal de esta interfaz es la lectura de los datos históricos de tres posibles formas:

- El primer mecanismo lee los datos en bruto del archivo, en el que el cliente define una o más variables y el dominio del tiempo que quiere leer. El servidor puede devolver todos los valores archivados en el rango de tiempo especificado y/o el número máximo de valores definidos por el cliente.
- El segundo mecanismo lee los valores de una o más variables para las marcas de tiempo especificados.
- El tercer mecanismo de lectura calcula los valores de datos agregados en la base de datos de históricos para el dominio de tiempo especificado y/o para una o más variables. Los valores incluyen siempre la calidad y la marca de tiempo asociada.

Además de los métodos de lectura, OPC también tenía define métodos para insertar, en sustitución, y eliminación de datos en la base de datos de históricos.

### 3. OPC UA

El objetivo principal de la comunicación OPC UA es mantener la funcionalidad del OPC clásico y migrar de la tecnología COM/DCOM de Microsoft a una tecnología de servicios de vanguardia.

Utilizando la tecnología de servicios de la web, la OPC UA se convierte en independiente de la plataforma y, por lo tanto, puede aplicarse en situaciones en las que la OPC clásica ya no se utiliza. La OPC UA se puede integrar sin fisuras en los sistemas de ejecución de fabricación (MES) y de planificación de recursos de la empresa (ERP), y funciona no sólo en sistemas Unix/Linux con Java, sino también en los controladores y dispositivos inteligentes que tienen sistemas de funcionamiento específicos con capacidad de funcionamiento en tiempo real. Por supuesto, la compatibilidad con las especificaciones OPC anteriores fue un requisito para la OPC UA. Por lo tanto, su uso no es exclusivo de los entornos de Windows donde la OPC clásica ya funciona en la actualidad, sino que se adapta a la Fundación de Comunicación de Windows de Microsoft, que también se puede poner en comunicación mediante servicios web.

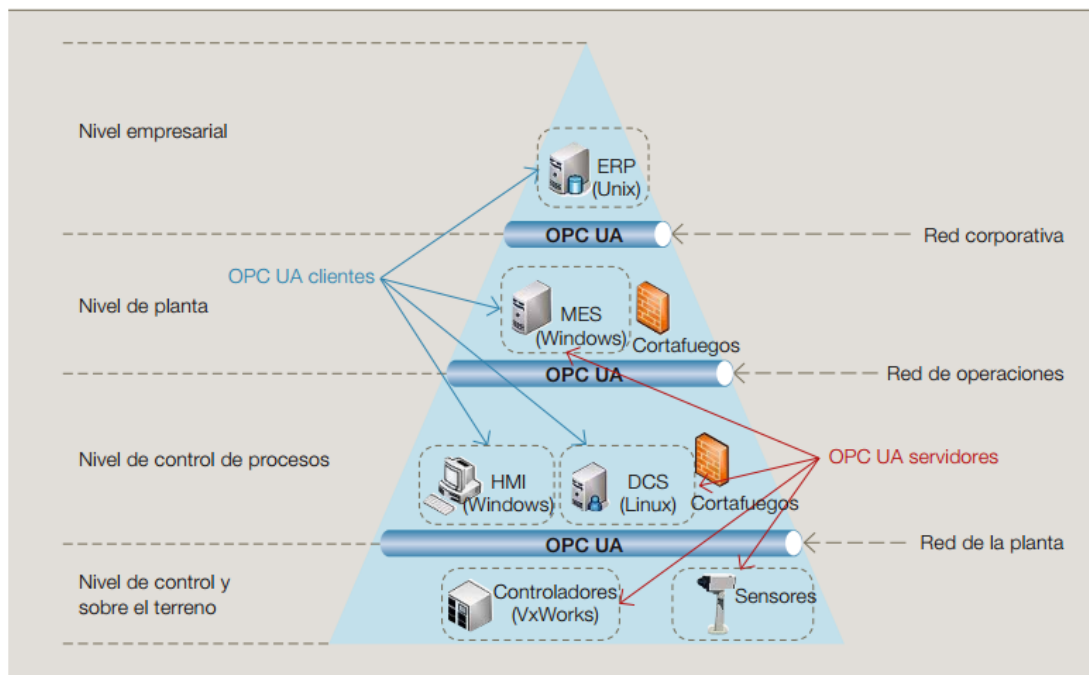


Ilustración 4: OPC UA puede utilizarse para aplicaciones en la pirámide de automatización.

La OPC UA tiene que satisfacer y mejorar los requisitos no funcionales de la OPC clásica y proporcionar, por ejemplo, una comunicación robusta, fiable, de gran rendimiento, adecuada para la automatización. Con lo aprendido de OPC XML-DA5) (el primer intento realizado por la Fundación OPC para proporcionar servicios web basados en XML), la OPC UA se diseñó para soportar la codificación binaria para el intercambio de datos de alto rendimiento.

Para ofrecer comunicaciones fiables, la OPC UA ha incorporado mecanismos capaces de afrontar problemas, como los mensajes perdidos. La OPC UA dispone de seguridad incorporada, un requisito que se ha vuelto cada vez más importante en entornos donde desde la red de la oficina se debe acceder a los datos de la planta. Así mismo, reúne las distintas especificaciones de la OPC clásica y ofrece un punto único de acceso a un sistema que proporciona acceso a los datos actuales, alarmas y sucesos, junto con el histórico de ambos. A diferencia de la OPC clásica, proporciona un conjunto reducido y único de accesos genéricos de servicio a toda la información. Mientras que la OPC clásica tiene un metamodelo muy sencillo, que proporciona etiquetas en una jerarquía sencilla, la OPC UA ofrece un modelo de información rico con técnicas orientadas a objetos.

Un metamodelo es un modelo que describe modelos. El metamodelo de una base de datos SQL define el concepto de tabla; en un lenguaje de programación orientado a objetos define los conceptos de clase y objetos; y en el lenguaje IEC 61131-3 el concepto de tareas, bloques de función, programas, etc. En la OPC UA, el metamodelo define los conceptos de objetos, sus tipos, variables, tipos de datos, etc. Un modelo de información es un modelo basado en un metamodelo que define una semántica específica (significado). En el caso de la OPC UA, esto se lleva a cabo principalmente mediante la definición de tipos específicos de objetos y variables, pero también con la definición de objetos y variables específicos que tienen una semántica específica (por ejemplo, puntos de acceso al espacio de direcciones de un servidor). Por ejemplo, un modelo de información para dispositivos analizadores basado en el metamodelo OPC UA se define especificando tipos concretos de analizadores. Un servidor OPC UA puede usar este tipo de información para representar los datos procedentes de un dispositivo analizador.

No solamente es posible proporcionar un valor medido y su unidad técnica con la OPC UA, sino también identificar el tipo específico de sensor de temperatura utilizado para obtener esa medida. Esta información es útil en situaciones típicas de la OPC clásica, porque se pueden usar los mismos gráficos (es decir, componentes y configuración de software) que se muestran en la estación de trabajo del operador, para cada dispositivo del mismo tipo que funcione en todo el sistema. Además, esta información también se puede utilizar en un ámbito más amplio de aplicaciones, como los sistemas MES y ERP, para ayudar a integrar datos sin necesidad de intercambiar listas de etiquetas que contengan el significado de éstas.

La OPC UA ofrece la flexibilidad necesaria para definir y utilizar modelos de información ricos, pero no obliga a usarlos. Un servidor OPC UA puede exponer un modelo sencillo de información, al igual que los servidores OPC DA actuales, pero también puede proporcionar mucha más información. Una ventaja importante de usar la OPC UA respecto a la OPC clásica, es que permite la modelización de la información y facilita muchas otras operaciones.

La OPC UA define un conjunto sencillo de tipos básicos que pueden ampliarse con modelos de información (ya sean modelos específicos de la aplicación y del proveedor o modelos normalizados). La idea es que la OPC UA especifique cómo se intercambian los datos, mientras que los modelos de información estándar especifican qué información se intercambia. El gran interés que suscita la modelización de la información ha generado el impulso para normalizar los modelos de información basados en la OPC UA. Los dispositivos de campo comunes podrían usar un modelo normalizado de información para permitir la interoperabilidad real plug-and-play de distintos proveedores. Este modelo se definió originalmente con la iniciativa de integración de dispositivos de campo (FDI), y ya ha sido refinado por el grupo de integración de dispositivos analizadores (ADI), que ha definido dispositivos analizadores concretos. Un grupo de trabajo, fundado en octubre de 2008 por PLCopen se ha centrado en un modelo de información OPC UA para los lenguajes IEC 61131-3. El empleo de modelos de información normalizados eleva la interoperabilidad a un nuevo nivel, no sólo porque permite el intercambio interoperable de datos, sino también por hacer el modelo interoperable. Esto puede, a largo plazo, reducir drásticamente los costes técnicos integrando sistemas que utilizan productos de distintos proveedores.

La OPC UA es fácil de adaptar a distintos tamaños en varias direcciones. Permite utilizar aplicaciones de OPC UA en dispositivos incrustados con recursos de hardware muy limitados, así como en máquinas muy potentes, como los grandes ordenadores centrales. Normalmente, servidores que funcionan en entornos tan diferentes no proporcionan la misma información. Es poco probable que el servidor del dispositivo incrustado proporcione un largo historial de datos, y sólo soportará unos pocos clientes, mientras que otros servidores pueden proporcionar varios años válidos de datos históricos y soportar miles de clientes.

Los aspectos de la modelización de la información de OPC UA también son escalables. Un servidor puede proporcionar cualquier cosa, desde un modelo muy sencillo, similar a la OPC clásica, hasta modelos muy complejos que proporcionan metadatos muy sofisticados sobre los datos suministrados. Un cliente puede no tener en cuenta esta información complementaria y proporcionar una visión simple de los datos o utilizar los metadatos proporcionados por el servidor.

La OPC UA define dos pilares principales que sustentan la interoperabilidad: la infraestructura de comunicaciones y el metamodelo OPC UA.

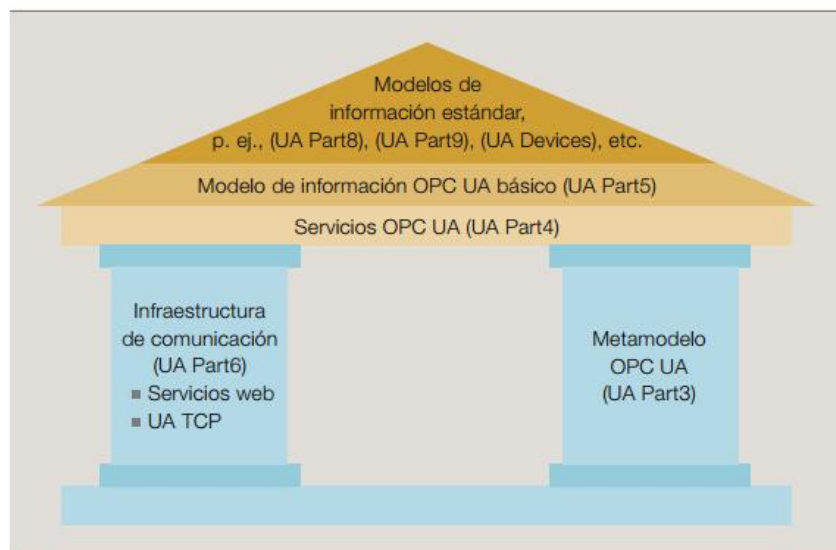


Ilustración 5: Pilares de OPCUA

La infraestructura de comunicaciones define cómo se intercambia la información, y el metamodelo define qué información se intercambia. Independientemente de la infraestructura de comunicación, la OPC UA define un conjunto de servicios abstracto que puede ejecutarse en distintas infraestructuras de comunicación y utilizar el metamodelo como base para definir los parámetros adecuados para los servicios.

El modelo de información OPC UA base proporciona los tipos base y los puntos de acceso al espacio de direcciones del servidor. Sobre el modelo de información de base se pueden establecer modelos de información normalizados o específicos del proveedor. La OPC UA ya define diversos modelos normalizados de información para el acceso de datos, alarmas y condiciones, programas, datos históricos y funciones agregadas. También proporciona los mecanismos para soportar múltiples modelos de información en un servidor. Los servicios pueden leer los datos sobre los modelos de información, de forma que los clientes que sólo conozcan los servicios sean capaces de acceder a toda la información. Por supuesto, los clientes que conozcan los modelos de información específicos pueden optimizarse utilizando ese conocimiento.

La OPC UA no es directamente compatible con la OPC clásica, ya que utiliza una tecnología diferente para la transmisión de datos. Para cumplir este requisito, sin embargo, la Fundación OPC no sólo suministra infraestructura de software para la comunicación OPC UA en ANSI C8, .NET y Java, sino también wrappers y proxies que o bien adaptan de forma automática los servidores existentes a los clientes OPC UA o proporcionan un servidor proxy a los clientes de OPC clásica para acceder al servidor OPC UA.

## 4. LIBRERÍA PROSYS OPC UA

Prosys es un proveedor de software de OPC UA .

Uno de sus productos es Prosys OPC UA Java SDK, que incorpora el desarrollo software del cliente y servidor así como capacidades de desarrollo de aplicaciones OPC UA en Java.

A continuación, se describirán brevemente algunos de los pasos a seguir para implementar un cliente SDK:

### 1. UaClient object

La clase UaClient es la clase principal con la que se va a trabajar. Encapsula la conexión con el servidor OPC UA y se ocupa de los diversos detalles en las comunicaciones reales OPC UA , que le proporciona una interfaz sencilla para acceder desde sus aplicaciones . Estas son las líneas en el SampleConsoleClient.java que crean la UaClient

```
private static UaClient client;
...
client = new UaClient(serverUri);
```

### 2. Conexión del servidor

El argumento serverUri , en el ejemplo anterior , define el servidor con el que se está conectando . Algunas de las muestras son URI

URI	Server
opc.tcp://<hostname>:52520/OPCUA/SampleConsoleServer	Prosys OPC UA Java SDK
opc.tcp://<hostname>:4841	Unified Automation
opc.tcp://<hostname>:62541/Quickstarts/DataAccessServer	OPC Foundation QuickStart

donde < hostname > es el nombre de host del equipo en el que el servidor se está ejecutando.

En lugar de utilizar el URI de esta manera, se puede definir como alternativa la conexión en partes utilizando las propiedades Protocol , host, port y el ServerName de UaClient . Estos constituyen la URI de la siguiente manera :

```
<Protocol>://<Host>:<Port><ServerName>
```

### 3. Conexión/Desconexión

Simplemente tiene que conectar con el servidor con:

```
client.connect();
```

Si esto no funciona, saltará una excepción:

- Si no se puede establecer la conexión real, obtendrá una `ServerConnectionException`.
- Si se obtiene una conexión, pero algo va mal en el servidor, el `UaClient` normalmente lanza una `ServiceException`. También puede ver un `ServiceFaultException`, `ServiceResultException` o alguna otra excepción en tiempo de ejecución, que son lanzadas por el stack real UA .

Una vez que tenga la conexión, puede empezar a comunicarse con el servidor.

Una vez que haya terminado, simplemente se interrumpe la conexión con la siguiente instrucción:

```
client.disconnect();
```

### 4. Explorar el espacio de direcciones

Lo primero que se debe hacer es encontrar las variables del servidor que se desean leer o escribir.

El espacio de direcciones OPC UA tiene una estructura un poco más compleja de lo que cabría esperar, pero, no obstante, se puede explorar por la navegación.

En el `UaClient`, se accede al espacio de direcciones a través de la propiedad `AddressSpace`.

Es posible que haya un gran número de referencias de un nodo, por lo que se puede definir algunas limitaciones sobre el tipo de resultados que se desean obtener. Por lo tanto, se pueden configurar éstos con las diferentes propiedades de la `AddressSpace`, por ejemplo:

```
client.getAddressSpace().setMaxReferencesPerNode(1000);
```

```
client.getAddressSpace().setReferencesTypeId(Identifiers.HierarchicalReferences);
```



## 5. Leer valores

Una vez que haya seleccionado un nodo , puede leer los atributos del nodo .

Existen varias lecturas en las llamadas alternativas que se pueden realizar en el UaClient. En SampleConsoleClient se usa la básica:

```
DataValue value = client.readAttribute(nodeId, attributeId);
```

De esta forma se lee el valor de un solo atributo del servidor. El atributo objeto de lectura está definido por el attributeId. Los identificadores válidos están definidos en la clase de atributos.

En general, se debe evitar llamar a los métodos de lectura de tareas individuales. Si se necesita leer varios elementos al mismo tiempo, se debe considerar el uso de client.read ( ). Es un poco más complicado de manejar, pero sólo se hará una sola llamada al servidor para leer cualquier número de atributos.

Y si se desea supervisar las variables que están cambiando en el servidor, será más recomendable utilizar suscripciones.

## 6. Escribir valores

Se pueden escribir valores en el servidor de la siguiente manera:

```
boolean status = client.writeAttribute(nodeId, attributeId, value);
```

Como respuesta, se obtiene un estado de éxito. False indica que el servidor va a completar la operación de escritura de forma asíncrona, en lugar de escribir el valor inmediatamente (al dispositivo).

Si la operación es fallida, se obtendrá una excepción.:

- Para los errores de llamada de servicio, se puede esperar ServiceExceptions.
- Para una operación individual que falla, obtendrá una StatusException. Un ejemplo de esto último es una operación de escritura en su defecto, cuando intenta cambiar un valor cuyos derechos de acceso no permiten el cambio.
- Si realiza varias operaciones en una sola llamada, sólo se puede esperar una ServiceException.

Para cada operación obtendrá una *StatusCode*, que indica qué operaciones individuales tuvieron éxito y cuáles fracasaron.

Se utiliza *StatusCode.isBad ()* y *.isGood ()* para comprobar si la operación ha fallado o no.

El *StatusCode* proporciona un código completo, que se puede comprobar contra los errores conocidos en *StatusCodes*.

En caso de fallo, también puede obtener información adicional en una estructura *DiagnosticInfo*. Estos campos están presentes en las excepciones. También puede examinar los códigos de resultado de la última llamada de servicio de `client.getLastServiceDiagnostics()` y `getLastOperationDiagnostics()`.

## 7. Suscribirse a los cambios

El siguiente ejemplo define una suscripción con un solo elemento.

```
Subscription = new Subscription();
MonitoredDataItem item = new MonitoredDataItem ( nodeId, attributeId,
MonitoringMode.Reporting);
subscription.addItem(item);
client.addSubscription(subscription);
```

Por supuesto, se puede definir cualquier número de suscripciones y cualquier número de elementos.

En el siguiente ejemplo, el cliente puede estar a la escucha de las notificaciones de cambio. El servidor se encarga de enviar dichas notificaciones cuando los valores de las variables de proceso cambian de acuerdo a las propiedades de la suscripción

```
item.addChangeListener(dataChangeListener);
```

El cliente, que está a la escucha, se define como:

```
private static MonitoredDataItemListener dataChangeListener =
new MonitoredDataItemListener() {
public void onDataChange(MonitoredDataItem sender, DataValue prevValue,
DataValue value){
MonitoredItem i = sender; println(dataValueToString(i.getNodeId(),
i.getAttributeId(), value));
}};
```