

Fascículo **6**

Cursos y
seminarios de
matemática

Serie B

Gabriel Acosta

Javier Etcheverry

Fernando Reitich

Rubén Spies

Domingo Tarzia

Cristina Turner

Adrián Will

(Editores)

TAMI 2010

Taller de Matemática Industrial

Departamento de Matemática

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

2010

Cursos y Seminarios de Matemática – Serie B

Fascículo 6

Comité Editorial:

Carlos Cabrelli (Director).
Departamento de Matemática, FCEyN, Universidad de Buenos Aires.
E-mail: cabrelli@dm.uba.ar

Guillermo Cortiñas.
Departamento de Matemática, FCEyN, Universidad de Buenos Aires.
E-mail: gcorti@dm.uba.ar

Claudia Lederman.
Departamento de Matemática, FCEyN, Universidad de Buenos Aires.
E-mail: clerderma@dm.uba.ar

Auxiliar editorial:

Leandro Vendramin
Departamento de Matemática, FCEyN, Universidad de Buenos Aires.
E-mail: lvendramin@dm.uba.ar

ISSN 1851-149X

Derechos reservados
© 2010 Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,

Universidad de Buenos Aires.
Departamento de Matemática
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires
Ciudad Universitaria – Pabellón I
(1428) Ciudad de Buenos Aires
Argentina.
<http://www.dm.uba.ar>
e-mail. secre@dm.uba.ar
tel/fax: (+54-11)-4576-3335

Matemática Industrial

Taller de Matemática Industrial

TAMI 2010

Buenos Aires
1-6 de Marzo 2010

Editado por

Gabriel Acosta
Javier Etcheverry
Fernando Reitich
Rubén Spies
Domingo Tarzia
Cristina Turner
Adrián Will

Taller de Matemática Industrial

Instituciones organizadoras

Departamento de Matemática, FCEN, Universidad de Buenos Aires, Argentina

ASAMACI - Asociación Argentina de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial

AR-SIAM - Sección Argentina de SIAM - Society for Industrial and Applied Mathematics (EE.UU.)

Comité organizador

Gabriel Acosta, FCEN UBA – CONICET (Bs. As.).

Javier Etcheverry, TenarisSiderca REDE-AR – FCEN UBA (Bs. As.).

Fernando Reitich, UMN (USA).

Rubén Spies, IMAL, CONICET – UNL (Santa Fe).

Domingo Tarzia, CONICET – UA (Rosario).

Cristina Turner, CONICET – UNC (Córdoba).

Adrián Will, UNT (Tucumán).

Comité organizador local

Gabriel Acosta, FCEN UBA – CONICET (Bs. As.).

Javier Etcheverry, TenarisSiderca REDE-AR – FCEN UBA (Bs. As.).

Mariana Prieto, FCEN UBA (Bs. As.).

Constanza Sánchez de la Vega, FCEN UBA (Bs. As.).

Auspiciantes



Prólogo

En los países avanzados la matemática juega un rol importante en la industria, en particular en las industrias que requieren de la innovación tecnológica para hallar nuevas oportunidades de negocios y distinguirse en un mercado global cada vez más competitivo. Esta participación de la matemática se logra, entre otras formas, a través de la actividad de los matemáticos en los centros de investigación de la industria y mediante convenios de investigación entre la industria y la academia.

En nuestro país esta integración no se da fluidamente: por un lado, la industria normalmente no reconoce la capacidad de la matemática (y de los matemáticos) para resolver problemas, y por el otro la academia no estimula y alienta suficientemente la formación de matemáticos con vocación de contribuir al mejoramiento de los procesos y productos industriales.

Con el propósito primario de contribuir a la interacción positiva de la industria y la academia, acercando profesores y estudiantes a la problemática industrial, y proporcionando a la industria una visión más cercana de las capacidades de la matemática para proveer respuestas a sus problemas, se organizó el Taller de Matemática Industrial, TAMI 2010, en el cual participantes industriales vinieron a proponer problemas, que estudiantes y graduados de las carreras vinculadas a las ciencias exactas atacaron durante una semana. No hay al momento ningún antecedente latinoamericano de este tipo de iniciativas, a pesar de que la necesidad de vinculación entre la Matemática (representada por los estudiantes de Matemática aplicada y el personal de las universidades e institutos de Matemática del país) y la industria es extremadamente grande. Tampoco hay canales formales sistemáticos que permitan establecer esta vinculación: hay escasísimos ejemplos de matemáticos trabajando en la industria y casi ninguno que mantenga una relación con la universidad como para servir de puente entre ambas realidades.

Como propósito secundario, aunque no menos importante, se pretende lograr convencer a las compañías e industrias de que pueden mejorar sus productos, sus procesos, sus servicios y sus estrategias de negocios a través de la aplicación de herramientas matemáticas avanzadas, mostrando efectivamente que el modelado y análisis a través de la Matemática, cuando son cuidadosamente utilizados, pueden acelerar dramáticamente la innovación y aumentar significativamente el rendimiento de sus negocios. Además, la expansión industrial de los últimos años después del proceso de desindustrialización de los '90 ha creado una carencia de personal técnico para las industrias, que justifica aún más echar mano a recursos humanos de elevada formación que no están actualmente dentro de los parámetros habituales de búsqueda de las empresas.

Este tipo de eventos ha demostrado ser una de las herramientas más fructíferas para estimular la relación entre academia e industria, y ha sido organizado con mucho éxito desde hace bastante tiempo en EE.UU. por el IMA (Instituto de Matemática Aplicada de Minnesota) y la Universidad de Minnesota, y en Europa por el Oxford Center for Industrial and Applied Mathematics, Reino Unido y el ITWM (centro de matemática industrial participante de la red de institutos Fraunhofer, Alemania).

Los principales beneficios para los estudiantes de participar en este tipo de eventos son:

- ampliar la educación matemática de los participantes, exponiéndolos al impacto que las ideas matemáticas tienen fuera del ámbito académico,
- mejorar su capacidad para trabajar atravesando las fronteras de la disciplina, dándoles oportunidad de comunicarse y aprender de investigadores con experiencia fuera de su ámbito normal,
- expandir sus oportunidades de carrera, proporcionándoles una experiencia industrial que no sólo enriquece sus opciones, sino que les da una experiencia de primera mano en el trabajo fuera de la academia.

A su vez, la industria puede:

- obtener la atención total de un grupo de matemáticos, físicos e ingenieros trabajando en un problema de su interés,
- contar con las ideas originales y desprejuiciadas que surgen del contacto entre gente talentosa y motivada y problemas complejos que son nuevos para ellos
- establecer contacto con una base de estudiantes y graduados recientes que normalmente no figuran dentro del alcance de las búsquedas de sus departamentos de recursos humanos,
- tener una experiencia directa respecto de las capacidades de los estudiantes de las carreras de ciencias, y establecer contactos específicos con algunos de ellos en función de su desempeño en alguno de los grupos, y
- obtener una vinculación con un núcleo representativo de profesores de la academia interesados en los problemas industriales, que podrían servir como consultores, ayudar al reclutamiento de personal, etc.

Para la Universidad, los beneficios principales son

- establecer contacto con las actividades productivas, lo que podría redundar en una mejor definición de los requerimientos para sus graduados
- obtener contacto con los departamentos de recursos humanos de las empresas, que le podrían permitir fomentar la educación de alto nivel a partir de becas conjuntas, etc,
- proveer a sus graduados con un vínculo con las actividades productivas, ampliando la base de inserción de los mismos y disminuyendo tanto la endogamia de algunos grupos de investigación como la necesidad de emigrar al exterior en busca de horizontes.

El Taller se llevó a cabo del 1 al 6 de marzo de 2010, en el Departamento de Matemática de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Se presentaron cuatro problemas industriales, respaldados por la presencia constante a lo largo del taller de representantes de cada industria:

1. *Optimización del transporte de caña de azúcar desde el Productor al Ingenio, en la provincia de Tucumán.* Presentado por Oscar Diez, de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Sebastián Rodríguez, del Centro de Investigación en Tecnologías Avanzadas, FRT, UTN, y Adrián Will de la Universidad Nacional de Tucumán.
2. *Optimización del Tratamiento Térmico de Productos Tubulares de Acero.* Tenaris. Presentado por Pablo Marino, Carolina Cincunegui y Christian Álvarez Tagliabue, de Tenaris.
3. *Mejora de la pirometría infrarroja aplicada a hornos de recocido continuo.* Presentado por Gabriel Cervellini y Diego Migliorino, de Ternium.
4. *Monitoreo Inteligente de procesos.* Presentado por Gabriel Horowitz, de YPF.

Los estudiantes y graduados participantes fueron unos veinte, casi todos de las carreras de matemática aplicada y de física. Asignados a los temas de acuerdo a sus preferencias, trabajaron en cuatro grupos desde el lunes hasta el viernes por la noche con gran entusiasmo (fue una constante que hubiera más de una docena discutiendo los problemas a las 19 o 19:30 horas, habiendo comenzado la actividad a las 9:00). Este mismo entusiasmo se vio reflejado en los participantes industriales, que se mostraron gratamente sorprendidos tanto del nivel como del empuje y creatividad de los participantes, que aportaron en todos los casos ideas, conceptos y resultados que ampliaron la visión que los proponentes tenían de sus problemas.

El sábado 6 por la mañana se realizó la presentación de resultados, y un breve acto de cierre, seguido de un almuerzo de camaradería.

El balance final es netamente positivo, y el Taller fue un éxito en todos los aspectos planeados originalmente. Contribuyó a reforzar la visión del decanato y el departamento respecto de que este tipo de actividad es valioso y muy necesario para la universidad, le dio a los estudiantes y graduados un contacto con problemas reales que valoraron mucho, les permitió interactuar con representantes industriales de una manera provechosa para ambos, desarrollar su capacidad de trabajar en equipo, etc. También los responsables por parte de la industria se fueron con la sensación de haber ganado sustancialmente en ideas y comprensión de sus problemas. En particular es probable que el desarrollo del problema de la caña de azúcar tenga un impacto significativo a corto plazo en la decisión de atacar el problema en toda su complejidad con las ideas esbozadas durante el Taller.

Finalmente, quisiéramos agradecer a todos los participantes por su interés y su motivación durante los seis días de trabajo continuo al que se debe sin duda el éxito del Taller. Agradecemos también a los representantes industriales, quienes aportaron su tiempo y su liderazgo durante todo el Taller, y a sus industrias que creyeron en esta iniciativa. La Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, la Fundación YPF y la Fundación para el desarrollo tecnológico FUDETEC aportaron el soporte material indispensable para esta iniciativa (estas últimas gracias a la convicción y el apoyo de Silvio Schlösser y Alberto Pignotti). La Universidad de Buenos Aires, y en particular la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y el Departamento de Matemática contribuyeron permitiéndonos usar el lugar físico y asegurando el alojamiento para participantes del interior. Agradecemos por ello al Decano de la FCEN, Jorge Aliaga, al Secretario de Investigación de la UBA, Hugo Sirkin, y a la Directora del Departamento de Matemática, Úrsula Molter. El apoyo de ASAMACI se manifestó en múltiples aspectos; el consejo y la participación de Domingo Tarzia y Rubén Spies fueron decisivos para la realización del Taller. También quisiéramos mencionar que un encuentro complejo, como éste, en el cual deben articularse las necesidades y requerimientos de la industria y la academia, no es posible sin la participación de mucha gente que sería difícil nombrar sin omisiones injustas. A todos ellos, nuestro reconocimiento. Por último, quisiéramos agradecer a nuestras colegas Mariana Prieto y Constanza de la Vega, quienes supieron resolver con éxito todos los aspectos prácticos del Taller.

Javier Etcheverry
Gabriel Acosta

TAMI 2010

Prólogo de ASAMACI

La Asociación Argentina de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial (ASAMACI) fue creada en la ciudad de Santa Fe el 31 de octubre de 2008 por 65 asociados fundadores y obtuvo su personería jurídica el 19 de mayo de 2009 como una asociación civil sin fines de lucro. Su antecedente previo, en Argentina, fue AR-SIAM, la Sección Argentina de la Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), creada en julio de 2006.

Entre los objetivos de ASAMACI se encuentran, entre otros, los siguientes:

- Procurar una mayor sensibilización y conciencia en y de la comunidad científica, la Administración del Estado, el sector Industrial, las empresas, organizaciones y de la sociedad en general respecto de la importancia de la Matemática Aplicada;
- Proveer un foro y un ámbito adecuados para la discusión y el desarrollo de la Matemática Aplicada en el país;
- Promover aplicaciones de la matemática en las Ciencias, la Ingeniería, las Empresas, la Industria y la Tecnología;
- Promover el acercamiento de todos los actores señalados, fomentando propuestas que conduzcan a la consolidación de las colaboraciones existentes y facilitando la iniciación de otras;
- Promover la investigación básica y la educación en Matemática cuyos resultados conduzcan a aplicaciones concretas, procurando su transferencia al medio;
- Promover la investigación interdisciplinaria con las diferentes disciplinas de la Ciencias y la Ingeniería en áreas y sectores que involucren a la Matemática, priorizando su interés. A tal fin ASAMACI estimula y realiza estudios e investigaciones de carácter científico, técnico y económico en todo lo relativo a la especialidad, con el propósito de incrementar el nivel y conocimiento de la labor que cumplen sus asociados;
- Participar y organizar congresos, ciclos, reuniones, conferencias, seminarios y otros eventos similares, sean nacionales o internacionales que se celebren con relación a los temas afines con la Matemática Aplicada, Computacional e Industrial.

Estamos plenamente convencidos de que en una industria crecientemente tecnificada la Matemática constituye una herramienta cada vez más importante, que tiene un impacto decisivo en el control y mejoramiento de los procesos productivos, en el control de calidad, en la creación de nuevas alternativas de procesamiento, en la disminución de los costos, en la racionalización de los sistemas de distribución, etc.. Por esa razón, y en cumplimiento de los objetivos previamente enunciados, es que ASAMACI decidió apoyar incondicionalmente la iniciativa de Javier Etcheverry, surgida en el año 2008, de la organización de este primer Taller de Matemática Industrial (TAMI 2010) que se desarrolló en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires en la semana del 1 al 6 de marzo de 2010. Fue considerada como una actividad vital y de gran importancia para el desarrollo industrial del país.

TAMI 2010

ASAMACI agradece profundamente a las empresas e instituciones que participaron del taller a través de la presentación de los problemas industriales a resolver (Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) y el Centro de Investigación en Tecnologías Avanzadas de la ciudad de Tucumán, Tenaris, Ternium e YPF), al Departamento de Matemática de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires por el apoyo brindado y de modo muy especial a Javier Etcheverry y Gabriel Acosta y a todos sus colegas por la excelente organización local de este primer Taller de Matemática Industrial en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Rubén D. Spies, Presidente de ASAMACI,
Domingo A. Tarzia, Vicepresidente 1° de ASAMACI.

Contenido

Participantes	1
Optimización del transporte de caña de azúcar desde el productor al ingenio en la provincia de Tucumán (<i>Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres</i>)	3
Optimización del tratamiento térmico de productos tubulares de acero (<i>Tenaris</i>)	16
Mejora de la pirometría infrarroja aplicada a hornos de recocido continuo (<i>Ternium</i>)	29
Monitoreo inteligente de procesos (<i>YPF</i>)	43
Opiniones de los participantes industriales	55

TAMI 2010

Participantes

Ezequiel Alfíe (UBA-Exactas)
Santiago Basso Morrow (UBA-Exactas)
Federico Carrá (UBA-Exactas)
Gisela Charó (UBA-Exactas)
Patricia Alejandra García (UBA-Exactas)
Juan Domingo González (UBA-Exactas)
Tomás Guozden (Instituto Balseiro)
Guillermo Raúl Igne
Mauricio Maestri (YPF)
Julián Martínez (UBA-Exactas)
Irina Moldavsky (UBA-Exactas)
Ricardo Alexis Muñoz Estéfano (UBA-Exactas)
Ignacio Ojea (UBA-Exactas)
Claus Rosito (UBA-Ingeniería)
Luciana Salvagni (UBA-Exactas)
Jorge Solanes (Ternium)
Sebastián Sosa (UBA-Exactas)
Daniel Ziella (UBA-Exactas)

Responsables industriales

Oscar Diez (*Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres*)
Adrián Will (*Universidad Nacional de Tucumán*)
Sebastián Rodríguez (*Centro de Investigación en Tecnologías Avanzadas, FRT, UTN*)
Gabriel Horowitz (*YPF*)
Pablo Marino (*Tenaris*)
Carolina Cincunegui (*Tenaris*)
Christian Alvarez Tagliabue (*Tenaris*)
Gabriel Cervellini (*Ternium*)
Diego Migliorino (*Ternium*)

Informe Final

TALLER DE MATEMÁTICA INDUSTRIAL 2010

Universidad de Buenos Aires

1-6 de marzo de 2010; Buenos Aires - Argentina

PROBLEMA: Optimización del Transporte de Caña de Azúcar.

Responsables:

Oscar Diez - Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres

Adrián Will - Universidad Nacional de Tucumán

Sebastián Rodríguez - Centro de Investigación en Tecnologías Avanzadas, FRT, UTN

Participantes:

Gisela Charó - UBA - Exactas

Luciana Salvagni - UBA - Exactas

Irina Moldavsky - UBA - Exactas

Santiago Basso Morrow - UBA - Exactas

Federico Carrá - UBA - Exactas

Claus Rosito - UBA - Ingeniería

Ignacio Ojea - UBA - Exactas

Discusiones y Comentarios:

Dr. Domingo Tarzia

Dr. Rubén Spies

Dr. Javier Etcheverry

Introducción

Nuestro grupo trabajó en el problema de optimización del transporte de caña de azúcar, que fue presentado en el TAMI por Oscar Diez, de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Adrián Will, de la Universidad de Tucumán, y Sebastián Rodríguez, del Centro de Investigación en Tecnologías Avanzadas de la UTN, que oficiaron como coordinadores del grupo durante el Taller .

El Problema General:

Tucumán cuenta con 15 ingenios, en los que se procesa la totalidad de la producción de caña de azúcar de la provincia. El transporte de la caña de los distintos productores hacia los ingenios se realiza en la actualidad a partir de convenios particulares que no tienen en cuenta el rendimiento final total de la cosecha. Así, un productor puede enviar la caña de sus tierras a un ingenio distante, aún cuando en el camino los camiones que realizan el transporte pasen por delante de otros ingenios.

Este problema es sólo un aspecto de otro mayor, que tiene que ver con la eficiencia global del sistema productivo. Actualmente, durante los primeros y los últimos días de la zafra (cosecha temprana y cosecha tardía), la caña madura no es suficiente para satisfacer la demanda de los ingenios. Inversamente, en el período intermedio la cantidad de caña sobrepasa la capacidad de procesamiento. Como consecuencia se produce menos azúcar de la que se podría. Teniendo esto en cuenta, la racionalización del transporte sería un primer paso en el avance hacia un sistema más eficiente.

Sin perder de vista este objetivo, la simple puesta en práctica, en el corto plazo, de un criterio optimizado de distribución representaría una mejora respecto de la situación actual. En primer lugar, disminuiría el consumo de combustible. Debe tenerse en cuenta que uno de los subproductos de la caña es el alcohol, a partir del cual se produce el bioetanol, y con el que se rebaja, por ley, un 5% de las naftas. En este sentido, la reducción del consumo de combustibles fósiles adquiere una doble importancia. Por otro lado, un mejor sistema de distribución tendría también una importante repercusión social. Los camiones que transportan la caña viajan usualmente de noche, sin luces y a muy baja velocidad y son, en consecuencia, responsables de numerosos accidentes de tránsito, puesto que no son vistos a tiempo por los automovilistas. La disminución de la cantidad de camiones recorriendo las rutas y caminos de la provincia contribuiría a reducir la cantidad de accidentes.

Finalmente, un sistema optimizado de distribución serviría, en vistas del problema general, como herramienta de diagnóstico permitiendo señalar algunos puntos por mejorar. Podrían, por ejemplo, identificarse zonas en las que sería provechoso cambiar la plantación de una variedad de maduración tardía a una de maduración temprana, con la que proveer a los ingenios cercanos en el primer período de zafra.

Objetivos

Para el trabajo en el taller, el problema fue dividido en dos partes sobre las que se trabajó de manera independiente. A saber:

Modelo predictivo del crecimiento de la caña:

El primer subproblema planteado consistió en encontrar un modelo con el cual describir el crecimiento de la caña de azúcar, tanto en condiciones normales, como al verse alterado su desarrollo por eventos favorables (riego, maduradores químicos, etc.) o desfavorables (heladas, sequías, plagas, etc.). Un modelo de estas características permitiría predecir el porcentaje de sacarosa de cada planta, facilitando la determinación del momento propicio para cosecharla. Antes del TAMI ya se contaba con un buen ajuste de los datos estadísticos a través de una función cúbica. El problema de este enfoque es que los coeficientes de un polinomio de grado 3 no tienen un significado claro que permita corregirlos para modelar los diferentes fenómenos que modifican el crecimiento de la planta.

Una de las principales dificultades de este problema recae en el modelado de la acción conjunta de diferentes factores, para lo que se cuenta con muy poca información. Sólo en una oportunidad se registraron los datos correspondientes a una helada y una sequía que afectaron simultáneamente las plantaciones. Las pérdidas fueron mucho mayores que las estimadas mediante la simple suma aritmética de ambos efectos.

Transporte de caña de los productores a los ingenios:

Asumiendo como dada la curva de crecimiento de cada variedad de caña, se desea optimizar la distribución desde las plantaciones hacia los ingenios. Para esto, se divide la zona azucarera en unidades productivas de la misma superficie, a las que llamaremos parcelas. Cada parcela tiene una cantidad de caña que varía (en calidad y cantidad) a lo largo del tiempo de acuerdo a su correspondiente curva de crecimiento. Cada ingenio, por su parte, demanda un cierto número de toneladas diarias para ser procesadas y tiene cierta eficiencia de acuerdo a la tecnología con la que cuenta. El criterio con el que se quiere optimizar es el del balance energético. Esto es: calculando por un lado la energía total obtenida como producto final (sea en forma de azúcar o de alcohol) y, por el otro, la energía total insumida a lo largo del proceso productivo (fertilizantes, combustible para la maquinaria de cosecha, para el transporte y para el procesamiento en el ingenio, etc.), se quiere maximizar el cociente entre ambas, (respetando, en la medida de lo posible, las demandas diarias de los ingenios). La resolución de este problema, entendido globalmente, implicaría determinar el momento en que cada parcela debe ser cosechada. En la actualidad, esto se decide teniendo en cuenta solamente el estado de maduración de la caña. A través del enfoque energético se espera obtener un mayor rendimiento general, aún cuando alguna parcela en particular deba ser cosechada antes o después de su momento de máxima maduración.

Trabajo Realizado y Resultados Obtenidos

Modelo predictivo del crecimiento de la caña:

Durante el taller se exploraron diferentes alternativas para modelar el crecimiento de la planta de caña. A continuación se desarrolla la evolución de las ideas estudiadas.

1. **Primera aproximación:** En primer lugar buscamos una función que describiera el comportamiento *normal* de la planta. Para ello dispusimos de un ejemplo numérico de un cañaveral creciendo en condiciones normales. Asumimos como dados los siguientes datos, para los cuales había ya estimaciones confiables:

- Velocidad de crecimiento inicial ($f'(0)$).
- Máximo global (en tiempo y cantidad).
- Velocidad de crecimiento post-máximo (variable).

A instancias del Dr. Tarzia, estudiamos el siguiente modelo:

$$f(t) = M(1 - e^{-a(t)})e^{-c(t)}$$

Esta función responde a la forma general de los datos disponibles, y ofrece importantes ventajas respecto de la aproximación cúbica: en primer lugar, el máximo se determina fácilmente en el parámetro M . Por otro lado los procesos favorables, que aceleran el crecimiento, deben afectar a la función $a(t)$, mientras que los desfavorables se expresan en $c(t)$. Sin embargo, y desafortunadamente, comprobamos que en un nivel más fino de análisis, un modelo de estas características no ajusta correctamente los datos empíricos. En f , la derivada en 0 y la altura del máximo están acoplados, es decir: al establecer un máximo M en un tiempo t_{max} fijo, queda determinada también la derivada en 0, lo que no responde a la realidad. Finalmente, los datos muestran una convexidad cerca de 0 que la función propuesta no modela.

Estudiamos algunas otras funciones de tipo exponencial, pero ninguna resultó satisfactoria: la Campana de Gauss, por ejemplo, al ser simétrica, no permite modelar los procesos degenerativos que llevan a una caída abrupta de la cantidad de sacarosa.

2. **Modelo polinomial:** A continuación estudiamos el modelo cúbico preexistente, con el objetivo de obtener fórmulas para los parámetros que faciliten la corrección ante fenómenos que alteren el crecimiento normal de la planta. Si bien obtuvimos algunas fórmulas prometedoras, tanto con cúbicas como con polinomios de grado 5, o mayor, llegamos a una conclusión similar a la anterior: el modelo polinomial no es capaz de aproximar razonablemente las situaciones anormales, dado que la caída abrupta ocasionada por los fenómenos degenerativos queda fijada, en el polinomio, según la parte normal de la curva: si la caña crece normalmente hasta el día 50, en que sufre una helada, los cambios en su correspondiente función deberían apreciarse sólo a partir de esa fecha, y no antes.

3. **Modelo por Convolutiones:** Propusimos luego un modelo basado en la noción de convolución de funciones de una variable real. La idea es esencialmente la siguiente: contando con una función $f : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$ para representar la evolución a lo largo del tiempo de la concentración de sacarosa en la caña en condiciones normales, cada uno de los factores externos que alteran este desarrollo normal debería modelarse a través de una función diferente que jugaría el papel de un núcleo de convolución. Así, la función g que describe el comportamiento de una caña afectada por un evento descrito a través del núcleo k sería:

$$g(t) = f * k = \int f(\tau)k(t - \tau)d\tau$$

Tras consultar al el Dr. Spies acerca de las características que debían tener estos núcleos para que el resultado ajustara mejor los datos, llegamos a la conclusión de que éstos debían ser funciones de dos variables, siendo una de ellas el tiempo. De este modo, la función g dejaría de ser una convolución, para ser, más generalmente, el resultado de integrar f contra un núcleo:

$$g(t) = \int f(\tau)k(t, \tau)d\tau$$

El motivo principal de este cambio de enfoque es que el efecto producido por un evento externo depende del momento en que éste se produce. La convolución, en cambio, afectaría a f uniformemente en el tiempo.

Las principales ventajas de este modelo serían las siguientes:

- No es necesario contar con una descripción analítica de la función f : la integral puede calcularse numéricamente a partir de los datos históricos (que pueden, además, ser actualizados anualmente).
- El modelo sugiere naturalmente cómo debería modificarse la función f por la presencia de distintos factores externos, consecutivos o simultáneos: se trataría simplemente de integrar sucesivamente contra los distintos núcleos.

Junto con Adrián Will, creemos que este modelo serviría particularmente para el modelado de factores que tengan un impacto suave sobre la función f (riego, uso de fertilizantes, etc.), mientras que podría no ser del todo útil para fenómenos como las heladas, que ocasionan una caída brusca del contenido de sacarosa. Si se encontrara algún método mejor con el que describir estos eventos, la integración contra núcleos apropiados podría servir, igualmente, para describir el acople de un efecto suave y uno brusco.

Lamentablemente, por falta de tiempo no nos fue posible poner a prueba este enfoque, pero confiamos en que su estudio posterior arroje resultados positivos.

4. **Ajuste porcentual:** Dados los problemas encontrados en los enfoques anteriores, y a instancias del Dr. Etcheverry, ensayamos una aproximación mediante la reducción porcentual del crecimiento. Partiendo de la curva de comportamiento normal de la caña modificamos su crecimiento de acuerdo al fenómeno externo que quisiéramos modelar, usando valores estadísticos conocidos.

El principal beneficio de este enfoque reside en su simplicidad. Su mayor desventaja se encuentra en que el modelo matemático general se mantiene desconocido. Además, sólo puede aplicarse a eventos para los cuales existe una base significativa de datos históricos, para los cuales, sin embargo, parece ser, por el momento, una de las técnicas de predicción más razonables.

Combinando funciones cuadráticas y cúbicas que describen los efectos de los distintos tipos de helada y el riego, obtuvimos una predicción que se ajusta muy bien a los datos disponibles. Dado un instante de tiempo en el que ocurre alguno de estos eventos, se pueden obtener las curvas de las variaciones en el contenido de sacarosa de la caña. A continuación se muestran algunos ejemplos:

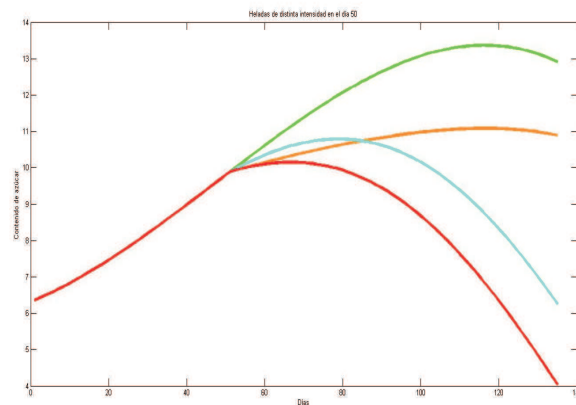


Figura 1: Heladas de diversa intensidad, ocurridas el día 50 vs. evolución normal (verde)

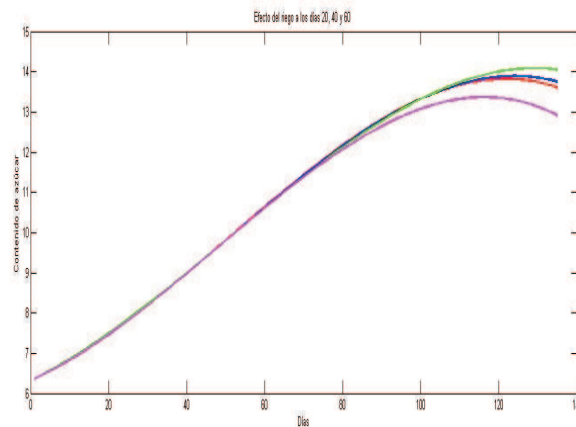


Figura 2: Efecto del riego a distintos tiempos.

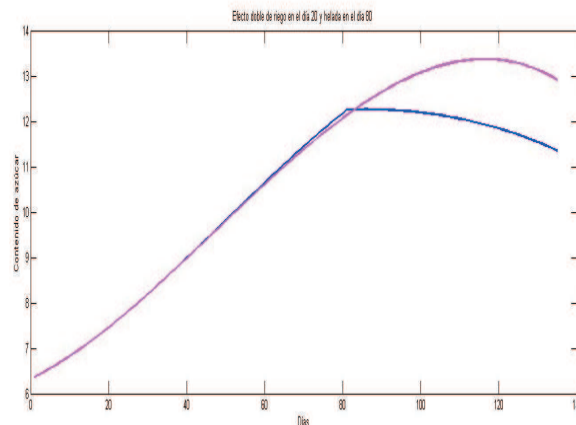


Figura 3: Efecto del riego en día 30 y helada en 50 vs. evolución normal.

Transporte de caña de los productores a los ingenios:

Dado el gran número de variables a tener en cuenta, el problema de la distribución de la caña entendido globalmente, a lo largo de toda la zafra, resultaba demasiado complejo para ser encarado durante un evento de la brevedad del TAMI. Nuestra primera tarea fue, por lo tanto, realizar algunas simplificaciones que facilitarían el abordaje, sin perder de vista los objetivos últimos. La reducción más significativa consistió en mirar el problema para un día fijo y no para el período completo de la cosecha. Dimos por sentado, por lo tanto, que algunas parcelas habían sido ya cosechadas, en base a algún criterio ajeno a nuestro enfoque. Por otro lado, consideramos que la demanda de cada ingenio se expresaba únicamente en toneladas netas de caña. Esta suposición no es del todo realista: la caña viene con cierto contenido de sacarosa y cierto contenido de fibra. Los ingenios, a su vez, pretenden obtener al final de la producción cierta cantidad de azúcar (sacarosa), y cierta cantidad de fibra, que luego utilizan como combustible. Podría suceder que una determinada distribución satisficiera la demanda en toneladas pero no la demanda de fibra, con lo cual el ingenio se vería obligado a utilizar gas natural, aumentando el costo energético de la producción. Sin embargo, teniendo en cuenta que tanto el contenido de sacarosa como el de fibra crece proporcionalmente con la caña, confiamos en que, estadísticamente, todas las demandas se vean satisfechas. En consecuencia, asumimos como dados los siguientes datos:

1. La producción, expresada en toneladas de caña, de una determinada cantidad de parcelas.
2. La demanda de cada uno de los ingenios, también expresada en toneladas de caña.
3. Una matriz de costos, expresados en energía: para una parcela fija i y un ingenio j , el costo c_{ij} responde al balance energético de llevar la producción de i a j , teniendo en cuenta el consumo de energía en i , el costo del transporte de i a j , y la eficiencia de j .

Con estas simplificaciones, llegamos al planteo matemático correspondiente a un *problema de transporte en un grafo bipartito*: de un lado tenemos las parcelas, cada una con una cierta oferta a_i y del otro los ingenios, con demandas b_j . De cada parcela salen flechas hacia todos los ingenios, cada una con el correspondiente costo, dado por la matriz c_{ij} . La incógnita es una matriz x_{ij} , conteniendo la cantidad de caña que se envía de la parcela i al ingenio j . Formalmente, el problema puede describirse del siguiente modo:

$$\begin{aligned} & \text{mín } \sum_{i,j} c_{ij}x_{ij} \\ \text{sujeto a: } & \begin{cases} \sum_i x_{ij} = b_j & \text{(se satisface la demanda de los ingenios)} \\ \sum_j x_{ij} = a_i & \text{(cada parcela envía toda su cosecha)} \\ x_{ij} \geq 0 & \text{(el envío es una cantidad positiva)} \end{cases} \end{aligned}$$

Este planteo agrega algunas simplificaciones a las ya explicadas: por un lado, supone que la suma de las demandas es igual a la suma de las ofertas; por el otro, admite la posibilidad de que una parcela fraccione su producción enviándola a distintos ingenios. Sin embargo, presenta una importante ventaja: se conoce un algoritmo polinomial que lo resuelve.

Si bien es cierto que en la realidad la demanda total de los ingenios no es idéntica a la oferta total de las parcelas, esto puede arreglarse fácilmente, a los fines de la solución algorítmica, aumentando o disminuyendo la demanda de cada ingenio proporcionalmente a su eficiencia.

La segunda suposición es un poco más delicada: una parcela es lo que consideramos la mínima unidad productiva. Fraccionarla resultaría impracticable en la realidad. De hecho, en una instancia posterior de la resolución del problema debería apuntarse a que *varias* parcelas, pertenecientes a un mismo dueño, enviaran su producción todas al mismo ingenio. Veremos que la estructura del problema real y la mecánica del algoritmo colaboran para evitar este fraccionamiento.

El Algoritmo Simplex para el Problema de Transporte (ver [1] p.150, [3] p. 415) es un algoritmo determinístico que resuelve nuestro problema simplificado, encontrando la solución óptima en tiempo polinomial. Para ello, parte de una solución inicial (que satisface las restricciones, pero no minimiza) y la modifica iterativamente respetando siempre las restricciones y disminuyendo progresivamente el costo. El algoritmo explora, mediante este procedimiento, soluciones con forma de árbol, esto es, en las que las ramas con *flujo* x_{ij} no nulo no forman ciclos.

La solución inicial se construye de manera muy sencilla, enviando la producción de las primeras parcelas al primer ingenio hasta satisfacer su demanda, continuando luego con el segundo y así siguiendo. Dado que las demandas serán satisfechas con exactitud, habrá a lo sumo tantas parcelas fraccionadas como ingenios. Considerando esto y teniendo en cuenta la mecánica interna del algoritmo y la diferencia entre demandas y ofertas (alrededor de 50000 toneladas contra 200), contábamos con que la solución minimizante obtenida fraccionara sólo algunas pocas parcelas.

Para favorecer este resultado, invertimos el problema, pensando que los ingenios se repartían en las parcelas y no al revés. Naturalmente, si la solución óptima fuese

única, este cambio no produciría ningún efecto. Pero si hubiese muchas, la modificación apuntaría a que el algoritmo encontrase una con la menor cantidad de parcelas divididas.

El algoritmo se detiene cuando la solución considerada verifica una sencilla ecuación que garantiza su optimalidad¹. El criterio con el que se pasa de una solución con forma de árbol a otra (hasta alcanzar la óptima) se encuentra regido por la misma ecuación y consiste, básicamente, en agregar una rama y sacar otra, de modo que el costo total disminuya. Podría suceder, sin embargo, que este procedimiento entrara en un *loop*, alternando una y otra vez entre dos soluciones con igual costo. Para evitarlo, debe adoptarse un criterio específico en la elección de la rama a eliminar, que puede verse en [3], páginas 421 a 425.

La implementación se realizó en MatLab, para facilitar la codificación, y arrojó resultados muy positivos. Oscar Diez construyó dos ejemplos, con parámetros realistas, para poner a prueba el algoritmo. El primero de ellos, muy sencillo, con tres ingenios muy cercanos, de eficiencia similar, y 150 parcelas distribuidas en forma de anillos de mayor calidad a medida que se alejan de los ingenios (Fig. 4).

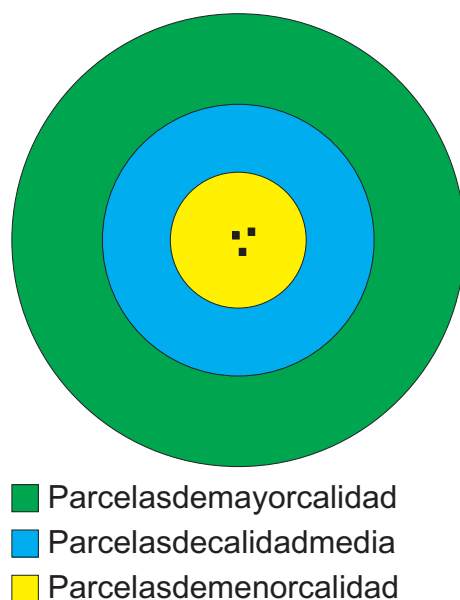


Figura 4: Ejemplo 1

Al construir la matriz de costos, se buscó compensar la distancia con la calidad: las parcelas más lejanas tienen mejor caña, de la que se obtendrá mayor energía, pero requieren un gasto mayor en transporte. El *costo* de llevarlas a los ingenios es, por lo tanto, similar al de las parcelas cercanas. La distribución arrojada por el algoritmo responde a este criterio. En la Fig. 5, se representan en el eje x los ingenios y en el eje y las parcelas. Las líneas rojas muestran a qué ingenio se transportó la producción de cada parcela. En esta solución sólo resultaron fraccionadas dos parcelas, es decir, una

¹El algoritmo en sí mismo es bastante simple. Sin embargo, se asienta sobre una teoría que excede los marcos de este informe y sin la cual resultaría imposible comprender su mecánica interna. Es por este motivo que omitimos los detalles de su implementación.

menos que la cantidad de ingenios.

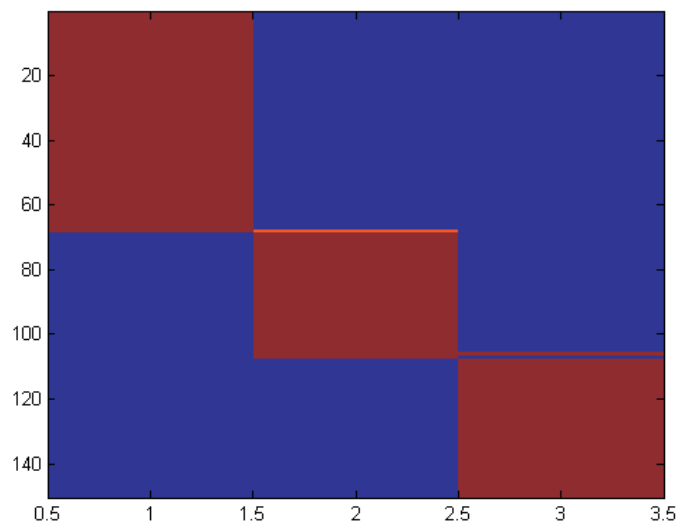


Figura 5: Distribución para el Ejemplo 1

El segundo ejemplo, más elaborado, constó de 6 ingenios distribuidos en forma de círculo con eficiencia decreciente en sentido antihorario (ver Fig. 6), y parcelas a su alrededor de calidad variada.

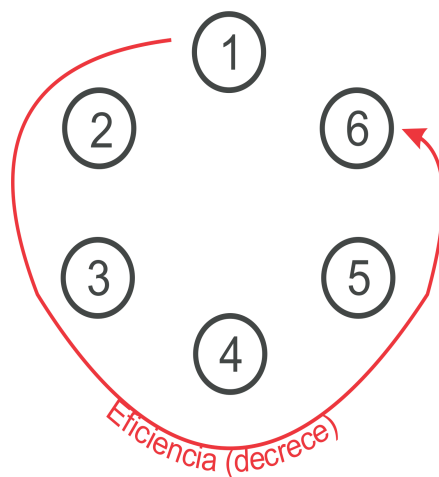


Figura 6: Ejemplo 2

La solución obtenida a través del algoritmo resultó nuevamente coherente con lo que esperábamos: los primeros ingenios, de mayor eficiencia reciben la caña de las parcelas cercanas, con muy poca dispersión, mientras los últimos, ineficientes, son abastecidos con aquellas parcelas que *sobraron* luego de satisfacer la demanda de los demás. (Ver Fig. 7).

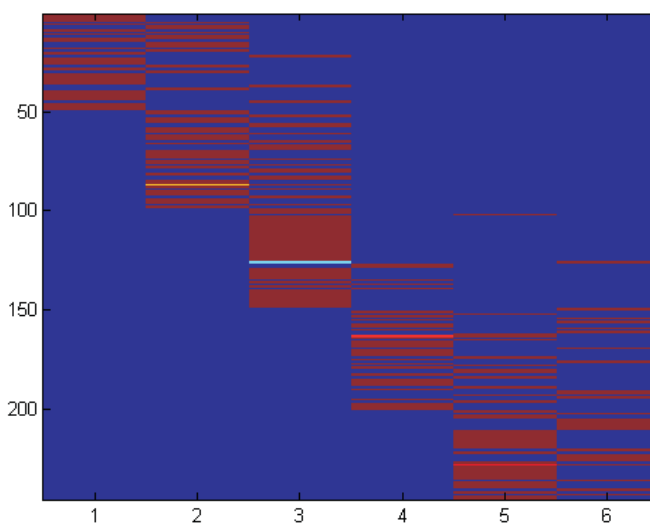


Figura 7: Distribución para el Ejemplo 2

Nuevamente, el número de parcelas fraccionadas fue uno menos que la cantidad de ingenios. Si este comportamiento se reproduce, como esperamos, en la solución del problema real, se obtendrían alrededor de 14 parcelas fraccionadas sobre un total de 3500 parcelas cosechadas en un día, defecto que puede ser fácilmente corregido a posteriori.

Trabajo Futuro

Modelo predictivo del crecimiento de la caña:

Las curvas obtenidas para el contenido de azúcar ajustan bien los datos empíricos relacionados con riego, heladas y estacionamiento, y permiten hacer predicciones útiles para la industria y ayudar a determinar el momento óptimo para la cosecha de cada parcela. Continuando en esta línea de trabajo, debería continuarse con el modelado de otros fenómenos (sequías, plagas, agroquímicos, etc.).

Como señalamos anteriormente, no está claro cómo podría utilizarse el ajuste porcentual para la predicción de resultados ante fenómenos acoplados (sequía y helada simultáneas, etc.). De aquí la importancia de explorar alguna de las otras líneas de investigación formuladas de manera incipiente durante el TAMI, principalmente la que aquí llamamos *modelado por convoluciones*. Este enfoque, creemos, podría tener más sentido desde el punto de vista biológico dado que el tipo de núcleo a utilizar debería responder a la naturaleza del fenómeno que se desee describir. Por otra parte, confiamos en que pueda construirse una ecuación diferencial que describa el comportamiento de la caña ante los distintos efectos: el modelado por convoluciones tiene una interpretación directa como representación de la solución de una ecuación diferencial y apuntaría, por

lo tanto, a facilitar el diseño de un modelo más completo y complejo de la situación.

Transporte de caña de los productores a los ingenios:

Si bien el algoritmo implementado es de complejidad $\mathcal{O}((nm)^2)$ (con n la cantidad de ingenios y m la cantidad de parcelas), confiamos que una codificación más prolija mejore significativamente su rendimiento. Algunas de las rutinas internas podrían ser paralelizadas, disminuyendo aún más el tiempo de ejecución.

Por otro lado, la solución que dimos para el transporte de la caña resultó satisfactoria, pero partió de una simplificación más o menos drástica del problema real. Su principal déficit es que corresponde a la distribución de un día fijo. Es decir: se optimizó el costo energético de transportar y procesar la caña *asumiendo que algunas de las parcelas habían sido ya cosechadas*, en base a criterios ajenos a nuestro enfoque.

Los resultados obtenidos podrían mejorar notablemente con un planteo que buscara optimizar el balance energético global, a través de los 180 días de la zafra, y que permitiera decidir cuándo cosechar cada parcela de acuerdo con este objetivo.

Sobre el final del TAMI, llegamos a esbozar el borrador de un planteo de este problema general, utilizando *programación dinámica*. Lamentablemente, los algoritmos determinísticos que podrían aplicarse al problema así descrito no son abordables computacionalmente. Sin embargo, creemos que contar con un planteo teórico del problema global representa un importante avance hacia su resolución y esperamos que nuestro enfoque ayude a elaborar alguna heurística que arroje resultados satisfactorios.

Consideraciones Finales

Más allá de las consideraciones técnicas respecto de los problemas estudiados, quisiéramos dedicar algunas palabras al TAMI como tal.

Para todos nosotros representó un estimulante desafío encarar la resolución de problemas reales, con todas las dificultades que les son inherentes. El Taller nos puso en contacto con especialistas en otras disciplinas, obligándonos a buscar un entendimiento por fuera de los tecnicismos matemáticos. En este sentido agradecemos a Oscar Diez, Adrián Will y Sebastián Rodríguez la claridad con que expresaron sus objetivos y la cordialidad y el buen trato que facilitaron y amenizaron los seis días de trabajo conjunto. Por otra parte, dada la complejidad que presentaban los problemas si se consideraban todas sus aristas simultáneamente, debimos hacer un esfuerzo por simplificarlos sin desvirtuarlos. El ejercicio de desmenuzar un problema complejo en partes más simples que puedan ser atacadas independientemente implica poner a prueba una gran variedad de recursos y conocimientos y constituye una experiencia invaluable para quienes aspiramos a aplicar la matemática a la resolución de problemas reales. Finalmente, el trabajo en equipo, la discusión grupal de ideas y enfoques diferentes, contribuyeron a ampliar y completar la perspectiva individual que cada uno tenía de los problemas.

El TAMI fue el ámbito en que pudo desarrollarse esta experiencia tan enriquecedora. Nuestro grupo estuvo constituido, en su mayoría, por estudiantes de la FCEyN, en la que este tipo de acontecimientos era, antes del TAMI, prácticamente desconocido. Queremos hacer llegar nuestro agradecimiento a los organizadores, expresar nuestra esperanza de que se realicen nuevas ediciones y ofrecer nuestra colaboración para que así sea.

Referencias

- [1] Puddu, Susana; **Investigación Operativa**, Apuntes de clase.
- [2] Papadimitrou, C.H. y Steiglitz, K.; **Combinatorial Optimization - Algorithms and Complexity**; Dover; 1998.
- [3] Ahuja, R; Magnanti, T. y Orlin, J.; **Network flows - Theory, algorithms and applications**; Prentice Hall; 1993.

Optimización del Tratamiento Térmico de Productos Tubulares de Acero

Gabriel Acosta, Patricia Garcia, Juan D. Gonzalez, R. Alexis Muñoz Estéfano
FCEyN UBA

Christian Álvarez Tagliabue, Carolina Cincunegui, Pablo Marino
Tenaris

15 de junio de 2010

1. Introducción

Este trabajo se realizó en el Taller de Matematica Industrial que se se llevó a cabo durante la primera semana del mes de Marzo de 2010, en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires.

2. Generalidades

El problema a abordar es el de la optimización del tratamiento térmico de productos tubulares de acero, presente en la empresa siderúrgica Tenaris. Más específicamente, se estudia el problema de dar un tratamiento adecuado a cargas retenidas en el horno de revenido. En este caso, el tratamiento térmico se compone de un primer calentamiento de los tubos a temperaturas cercanas a los 900°C , en el que se austeniza el material, seguido por un enfriamiento rápido en el que el material se transforma en martensita. Esta etapa constituye el templado del acero. Para lograr las propiedades metalúrgicas finales especificadas para el producto se realiza un segundo calentamiento a temperaturas entre 500 y 700°C , que se denomina revenido (ver figura 1). Para simplificar el análisis, en este trabajo se considera una única propiedad metalúrgica, la dureza, que para el producto que se analiza debe estar en el rango de 270 - 300 Hv.

Dentro del horno de revenido (ver figura 2), los tubos son desplazados mediante un mecanismo de barras móviles a través de una serie de posiciones fijas (denominadas bolsillos), deteniéndose en cada una de ellas durante un período de tiempo denominado cadencia.

El horno está dividido en zonas que cuentan con una regulación independiente de temperaturas. De acuerdo a cuáles hayan sido las temperaturas de las zonas del horno a

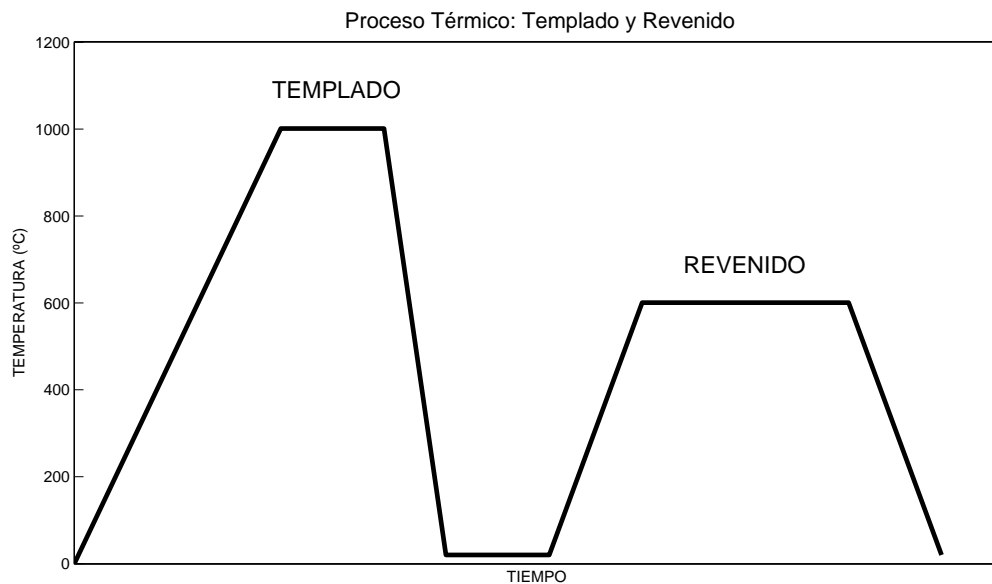


Figura 1: Esquema simplificado del ciclo térmico que se sigue en un proceso de temple y revenido

las que haya estado expuesto un tubo durante su pasaje por el mismo, éste seguirá una curva de calentamiento $T(t)$. Normalmente se utiliza el parámetro P , conocido como la versión integral del Hollomon-Jaffe, para caracterizar el avance del proceso de revenido:

$$P(t) = \int_0^t \exp^{-\frac{Q}{R \cdot T(s)}} ds$$

Donde $T(s)$ es la temperatura del tubo a tiempo $t = s$; Q es la energía de activación ($Q = 425000 \frac{\text{Joules}}{\text{Mol}}$); y $R = 8,315 \frac{\text{Joules}}{\text{Mol} \cdot ^\circ\text{K}}$;

Es posible correlacionar empíricamente a la dureza H con el parámetro P . En nuestro caso utilizamos la siguiente expresión:

$$H(P) = \begin{cases} H_0 - (H_0 - H_{min}) \cdot \frac{w^2}{(\log_{10}(P) - \log_{10}(P_{max}))^2 + w^2} = & \text{si } P \leq P_{max} \\ H_{min} & \text{si } P > P_{max} \end{cases}$$

con los siguientes valores para los parámetros:

- $H_0 = 480Hv$
- $H_{min} = 225Hv$

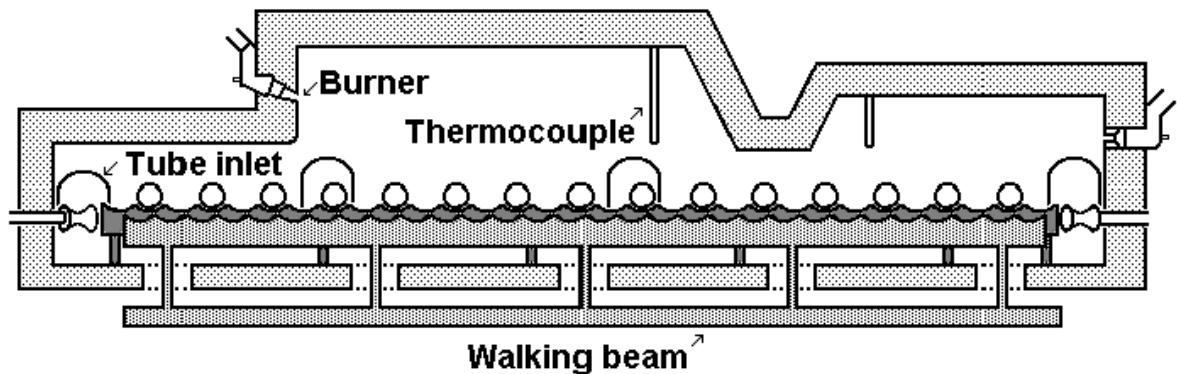


Figura 2: Sección transversal de un horno de tratamiento térmico

- $w = 4,6$
- $\log_{10}(P_{max}) = -18$

Se pone énfasis en el hecho de que el parámetro P es una integral de la temperatura, es decir que su valor (y luego la dureza H) depende de toda la historia térmica del tubo y no sólo de la temperatura que tiene el tubo al momento de salir del horno.

En condiciones normales, con el horno en funcionamiento estacionario, se determinan el tiempo de ciclo y las temperaturas adecuadas para cada zona, de forma tal que los tubos obtengan la dureza deseada.

3. Carga retenida-Estrategia Standard

Eventualmente, cuando hay problemas en la línea de producción, la carga puede quedar retenida en el horno. En estos casos, la mayor permanencia en temperatura produce una caída en la dureza de los tubos que la excluye del rango deseado y obliga a su reprocesamiento con los consecuentes costos extras. A esta situación la llamamos **Carga retenida**. El tiempo durante el cual la línea se encuentra detenida, se denomina tiempo de parada; el tiempo en el que la línea comienza a avanzar, tiempo de arranque.

A la política actual que utiliza la planta cada vez que la carga queda retenida, la denominamos **Estrategia Standard**, que consiste en:

- Habiendo transcurrido 5 minutos de producida la parada, se reducen 20°C las temperaturas de cada zona del horno.
- Una vez reanudada la producción, se restituyen las temperaturas de zona a los valores originales.

- Según el tiempo de duración de la parada y la zona del horno en que cada tubo haya quedado retenido, éstos son directamente reprocesados, inspeccionados para decidir si es necesario o no su reprocesamiento, o se considera que esta inspección no es necesaria.

Apuntando a lograr una mejora en la estrategia Standard, el primer objetivo de este trabajo consiste en determinar un plan de acción óptimo que minimice el perjuicio generado por las detenciones o “paradas”, suponiendo conocido el tiempo de parada y de arranque.

Disponer de una estrategia óptima suponiendo conocido el tiempo de parada permitirá un abordaje general, enfocado al estilo de Teoría de Juegos, para la situación real en la que la duración de la parada es desconocida. Este abordaje se comenta hacia el final del informe.

4. Modelado del Horno

Tenaris posee modelos muy completos del funcionamiento de los hornos de revenido [2], estos son modelos tridimensionales que tienen en cuenta la geometría real de los hornos y de los tubos, lo que los hace muy costosos computacionalmente. Teniendo en cuenta que las estrategias de optimización requieren numerosas evaluaciones del modelo, en este trabajo se realiza un modelo simplificado del horno que permite abordar el problema y obtener conclusiones que orienten el tratamiento con modelos más complejos. Dicho modelo simplificado consiste en:

- Dar una geometría más sencilla al horno (ver figura 3), dividiéndolo en cuatro zonas geométricamente iguales, cada una con una temperatura propia regulada individualmente.
- Simplificar la geometría de los tubos, considerándolos planos y de temperatura uniforme.
- Calcular la temperatura de los tubos considerando los intercambios de calor radiativos entre el techo, las paredes del horno y los tubos (para lo cual deben calcularse los correspondientes factores de vista) y convectivos, entre los gases del interior del horno (supuestos a la temperatura de la zona correspondiente) y los tubos.

Por lo tanto, las ecuaciones que determinan la temperatura $T_i(t)$ del tubo i en el instante t son de la forma:

$$\begin{cases} \rho c_p V \frac{dT_i}{dt} = & A_i q_i \\ T_{i(t=0)} = & T_{ambiente} \end{cases}$$

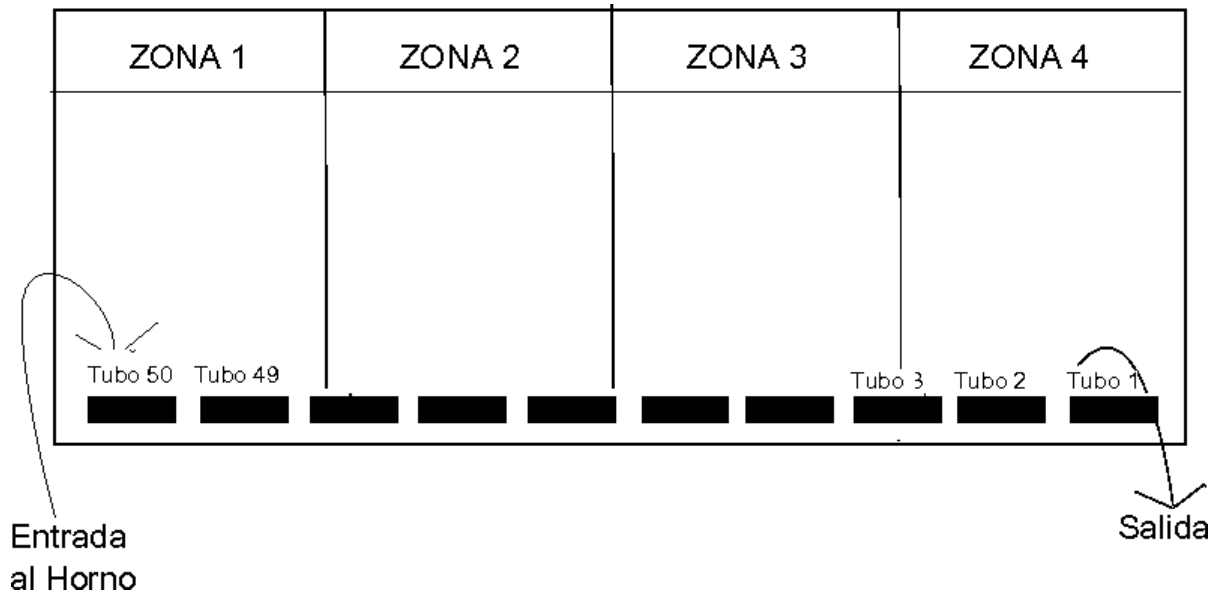


Figura 3: Horno de revenido simplificado

donde

$$q_i = M \cdot E_b(T_1, \dots, T_n, T_{Z_1}, T_{Z_2}, T_{Z_3}, T_{Z_4})$$

con T_{Z_j} las temperaturas de cada zona en el instante t , M una matriz relacionada con la matriz de factores de vista y $E_b(T)$ la potencia emisiva [1]. Se utilizan los siguientes valores para la densidad $\rho = 7840 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ y el calor específico del acero $c_p = 450 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$. A y V son el área y el volumen de los tubos. La temperatura ambiente es 20°C y la cadencia 60s.

En primer lugar, con este modelo se determinaron las temperaturas de zona de un régimen estacionario, realizando pruebas hasta alcanzar una dureza en los tubos a la salida del horno cercana al valor medio del rango de durezas deseado, o sea 285 Hv. Como resultado, se determinaron las siguientes temperaturas de zona: 600, 640, 680, y 680°C , con las que se alcanza una dureza de 287 Hv. En la figura 4 se observa el gráfico de la curva de temperaturas del tubo que logra esta dureza utilizando el modelo simplificado, que puede compararse con un perfil de temperaturas típico obtenido experimentalmente (figura 5).

5. Cuantificación de las pérdidas

Una vez ajustado el modelo a la dureza deseada, se analizaron los resultados correspondientes a una parada de 30 minutos en dos situaciones conocidas:

- En la primera se considera el caso en el que no se modifican las temperaturas de las

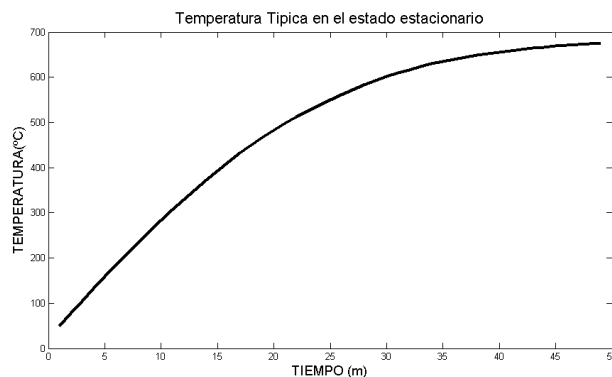


Figura 4: Curva de temperaturas obtenida con el modelo para el caso estacionario que produce la dureza especificada

zonas (es decir, no se toma ninguna acción). A este caso lo llamamos **Caso Neutro** y permite magnificar la magnitud del problema.

- La segunda consiste en aplicar la política actual de la planta (“**estrategia standard**”).

Los resultados de estas simulaciones se presentan en la figura 6, en la que la numeración de los tubos es la dada por la figura 3.

Luego, se buscó desarrollar estrategias que mejoraran los resultados obtenidos mediante la estrategia standard. Esta mejora se midió de dos formas: en primer lugar, mediante la cantidad de tubos con dureza resultante fuera del rango deseado; en segundo lugar, a partir de la desviación de las durezas obtenidas con respecto a la dureza del régimen estacionario, mediante un índice de desviación dado por la siguiente expresión:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (d_j - d_e)^2}{n - 1}} \quad (5.1)$$

Donde d_e indica la dureza que se logra en el estado estacionario; d_j , indica la dureza del tubo j al salir del horno; y n indica el número de tubos que estamos analizando para nuestro caso, $n = 100$, es decir, miramos los 50 tubos que quedan retenidos en el horno y los 50 siguientes.

Notemos que F es un promedio cuadrático de cuánto se aparta la dureza de cada tubo de la dureza estacionaria (que es la dureza deseada). Este factor F es la cuantificación usada para medir la efectividad de cada política de manejo de temperaturas de las zonas del horno ante una parada, dado que la dureza resultante en los tubos está sometida a fluctuaciones producidas por efectos no considerados por este modelo (v.g. inhomogeneidades de temperatura en el tubo o en la distribución inicial de durezas) que pueden generar

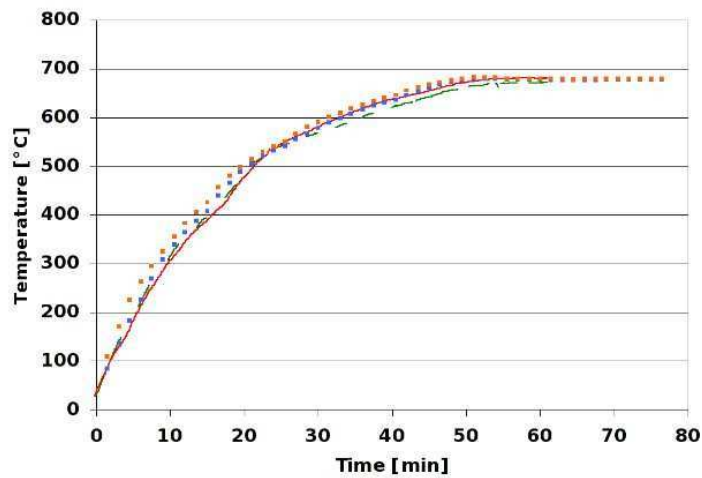


Figura 5: Típica curva de calentamiento estacionario en un horno de Revenido, obtenida experimentalmente

variaciones considerables con respecto a la dureza esperada. Así, un tubo con una dureza cercana a los límites del rango puede no estar sujeto en realidad a los requerimientos de calidad.

En la figura 6 se observa que, para una parada de 30 minutos, la estrategia standard es mejor que la estrategia neutra. La figura también indica los valores de F en cada situación. En especial, los valores de F en el caso Neutro son mayores que en el caso standard.

6. Optimización del Proceso Conociendo El Tiempo de Parada

En esta sección se estudia la posibilidad de mejorar la estrategia standard para paradas de duración conocida (30 minutos). El proceso se optimizó según distintos enfoques, en este trabajo se seleccionaron dos de ellos (de complejidad creciente). Para una mejor identificación de los mismos los notamos como **Estrategia Mejorada** y **Estrategia Optima**.

a) Estrategia Mejorada

En este caso, cada zona del horno se controla según dos parámetros. El primero, ΔT_Z , indica cuántos grados se desciende la temperatura (a razón de 3°C por minuto, que es el valor que típicamente limita las excursiones en las temperaturas de zona); el segundo, t_e , cuánto tiempo se espera antes de restituir la temperatura a su valor original. La restitución también se hace a razón de 3°C por minuto.

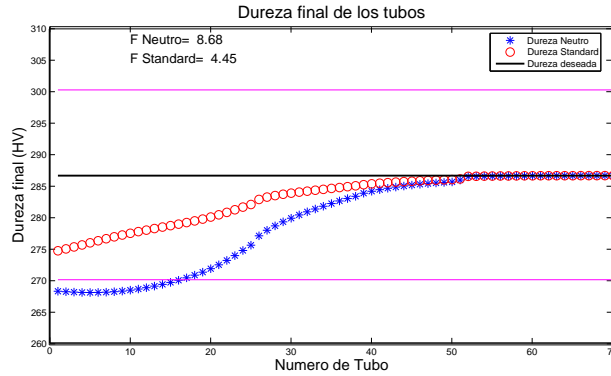


Figura 6: Dureza de los tubos al salir del horno después de una parada de 30 minutos

Observamos que cada par $(\Delta T_Z, t_e)$ representa un manejo de temperaturas de zona, es decir una estrategia adoptada. Lógicamente, el tiempo de descenso de la temperatura más el tiempo de espera debe ser mayor que la duración de la parada. De lo contrario, la restitución de la temperatura podría empezar antes del tiempo de arranque, generando una estrategia que abusa del hecho de que la duración de la parada está fija en 30 minutos. Por otro lado se permite empezar a restituir la temperatura un tiempo después del tiempo de arranque t_A (y no inmediatamente). Así se tiene la restricción:

$$\frac{\Delta T_Z}{3} + t_e \geq t_A - t_P$$

Donde por t_P entendemos tiempo de parada (el tiempo en el cual la carga queda retenida), t_A es tiempo de arranque (el tiempo en el cual se reanudó la línea de producción).

Luego, para cada una de las cuatro zonas se determinan pares $(\Delta T_Z, t_e)_j$, con $1 \leq j \leq 4$ que representan los controles de temperatura en las zonas del horno. De esta manera, para cada elección posible de $(\Delta T_Z, t_e)_j$, tenemos un valor del funcional F definido anteriormente.

$$F = F((\Delta T_Z, t_e)_j)$$

Se recuerda que F da una medida de cuanto se alejan los tubos de la dureza deseada, cuando son retenidos en el horno.

La optimización, se realiza minimizando el funcional F , que alcanza un mínimo(local) para un par $(\Delta T_{Z_0}, t_{e_0})_j$, que representa una estrategia. A esta estrategia obtenida la llamaremos **Estrategia Mejorada**. La minimización se desarrolló utilizando la función “fminsearch” de Matlab, esta rutina está inspirada en el algoritmo Nelder-Mead

simplex [3] y tiene como input, al funcional F y al par $(\Delta T_Z, t_e)_j$ inicial. El mínimo que logra este algoritmo es local, pero aún así se pudo mejorar el caso Standard con esta técnica.

La ventaja que tiene este algoritmo es que no necesita suavidad del funcional. Justamente, en la implementación del modelo del horno, se trabajó con tiempo a unidades discretas (el tiempo se midió en unidades de cadencia, es decir minutos enteros). Esta discretización del tiempo lleva a tener un funcional poco suave, impidiendo minimizaciones más eficientes mediante otros métodos que requieren suavidad en el funcional a minimizar.

La presentación del resultado de la estrategia mejorada, se da por medio de dos figuras, en la figura 7 se observa la dureza del caso estandar versus la dureza del caso mejorado. En la figura 8 se observa el manejo de las temperaturas de las cuatro zonas de los hornos.

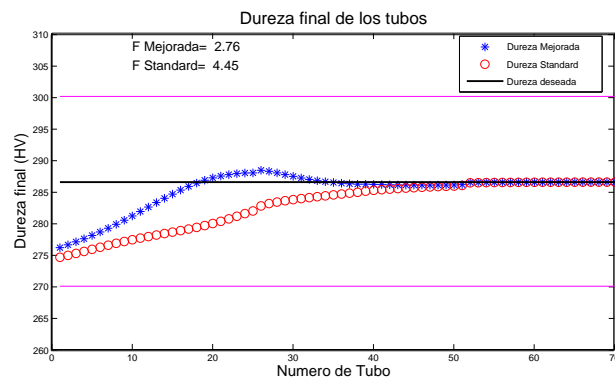


Figura 7: Dureza de los tubos: estrategia Mejorada versus estrategia Standard

- b) **Estrategia óptima** La otra estrategia seleccionada para presentar en este trabajo consiste en dar una mayor variabilidad a las temperaturas de zona permitiendo que las mismas varíen regularmente dentro del tiempo de parada más un margen extra de tiempo, de forma tal que cada vez que transcurre un tiempo determinado la temperatura de cada zona asciende o desciende, respetando la limitación de no variar más de 3°C por minuto. Finalizado este período, las temperaturas de zona son restituidas a sus valores estacionarios. En una primera instancia, se considera que las temperaturas de zona varían de igual forma. Esta estrategia da los mejores resultados hasta el momento, por ello es referida como **Estrategia óptima**. No obstante, es plausible obtener mejoras significativas en la estrategia óptima, ya que por falta de tiempo quedó pendiente analizar el caso en el que las temperaturas de zona puedan variar en forma independiente. Se presentan los resultados en las figuras 9 y 10, de la misma manera que se hizo para el caso anterior.

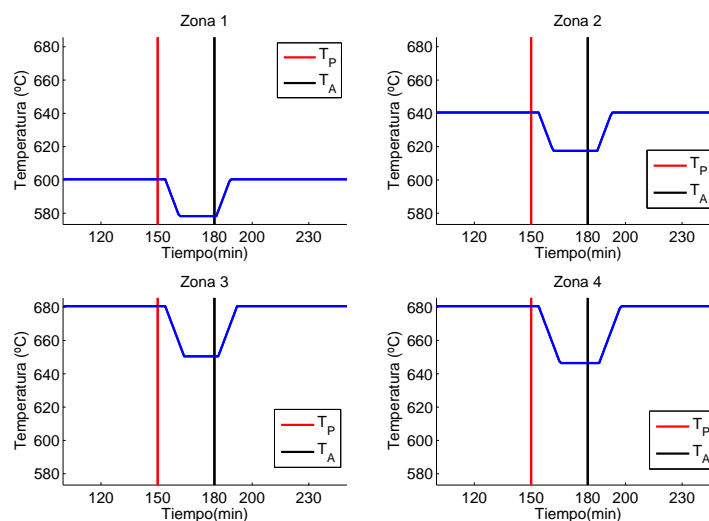


Figura 8: Manejo de los hornos para la estrategia mejorada

Todas nuestras estrategias fueron diseñadas en función a un mismo tiempo de parada (30 min).

7. Optimización del Proceso Desconociendo el Tiempo de Parada

En la Sección previa estudiamos el problema de buscar una estrategia que mejore a la Standard para un tiempo de parada de 30 minutos. En principio entonces es posible repetir esas ideas para diferentes tiempos de parada, de digamos 10, 20, ..., 120... minutos. Es de esperar que en cada caso varíen los parámetros óptimos dando lugar entonces a una serie de estrategias S_1, S_2, \dots cada una de ellas adecuada para enfrentar paradas de 10, 20, ... minutos. Considerando que el operador desconoce a priori la longitud de la parada aparece el problema de cuál de los S_j utilizar en una parada dada. Si bien durante el taller no hemos llegado a explorar esta cuestión en profundidad proponemos algunas ideas que consideramos pueden resultar útiles en este sentido. Vamos a introducir estas ideas de un modo general. Por un lado podemos pensar que que trabajamos con una función de costo genérica F que no necesariamente tiene que coincidir con (5.1). A cada falla (parada) vamos a llamarla evento utilizando una numeración consecutiva E_1, E_2, \dots para paradas de 10, 20, ... Fijada la función F podemos entonces calcular el costo $F_{i,j}$ de utilizar una estrategia S_i ante un evento E_j . Por último vamos a generalizar las nociones de eventos y estrategias: un evento E es una distribución de probabilidades sobre los E_i (i.e. $E = \{q_1, q_2, \dots\}$ donde $P(E_i) = q_i$) y análogamente una estrategia S es una distribución

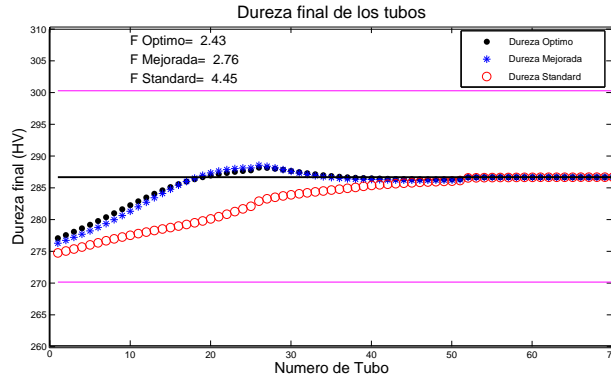


Figura 9: Dureza de los tubos para las estrategias Optima, Mejorada y Standard

de probabilidades sobre las S_i (i.e. $S = \{p_1, p_2, \dots\}$ donde $P(S_i) = p_i$). En este sentido elegir una estrategia ahora corresponde a elegir una distribución de probabilidades que me diga como utilizar las S_i .

Esta claro que si se elige una S y una E entonces el costo resultante es (en valor esperado, y considerando que las elecciones se realizan de modo independiente)

$$F(S, E) = \sum_{i,j} p_i q_j F_{i,j} \quad (7.1)$$

y esto nos conduce a las dos siguientes alternativas:

1. Trabajar con E conocido.
2. Trabajar con E desconocido.

El caso 1) es útil si se tiene una estadística confiable de las fallas. En ese caso la solución del problema buscado corresponde a minimizar (7.1) sujeto a la restricción $\sum_i p_i = 1, p_i \geq 0$ (observar que tanto q_j como $F_{i,j}$ son conocidos en este caso). Para dar una respuesta en el caso 2) el problema se piensa en el marco de la teoría de juegos. Si suponemos que los $F_{i,j}$ nos dan la matriz de pagos de un juego de suma cero y que los E_i y S_i representan las estrategias de cada uno de los jugadores, entonces el jugador de estrategias S_i (operario de la planta) debería calcular la estrategia óptima (el S) dada por la teoría de juegos de suma cero. Un juego de suma cero tiene siempre un precio (o valor) que es lo que debe pagar una de las partes para que el juego sea justo. El Teorema del Minimax [4] asegura que siempre existe al menos una estrategia (denominada óptima) para cada jugador que le permite a uno de ellos asegurarse esa ganancia y al otro limitarse a esas pérdidas (independiente de lo que elija hacer su oponente). No entramos aquí en detalles, la perdida garantizada por el operario es

$$\min_S \max_E F(S, E)$$

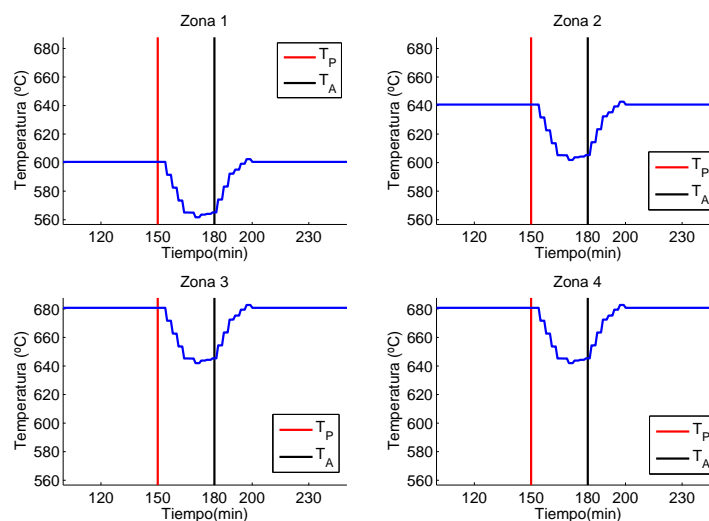


Figura 10: Manejo de los Hornos para la Estrategia Optima

la estrategia óptima puede calcularse fácilmente resolviendo un problema de programación lineal. En algún trabajo posterior estudiaremos la viabilidad de estas ideas.

8. Conclusiones

Se implementó un modelo simplificado del calentamiento de tubos en un horno de revenido, que permite evaluar el efecto de distintos tratamientos en las temperaturas de las zonas a fin de minimizar el número de tubos a ser reprocesados. Los resultados obtenidos, aunque de carácter preliminar, están cualitativamente de acuerdo con la práctica industrial y muestran posibilidades de mejora a través de una mayor reducción de las temperaturas de zona durante la parada y postergando el momento en el que se restituyen las temperaturas de zona correspondientes a la operación estacionaria. Por último se discute la forma de implementar una estrategia para paradas de duración desconocida, apelando a la Teoría de Juegos.

Referencias

- [1] LIENHARD, J. H. IV, LIENHARD, J. H. V *A heat transfer textbook*, Phlogiston Press, 2005.

- [2] MARINO, P. *Numerical Modeling of Steel Tube Reheating in Walking Beam Furnaces*, Proceedings of The Fifth European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Espinho, Portugal, 11-14 April 2000
- [3] LAGARIAS, J. C., REEDS J. A., WRIGHT M. H., AND WRIGHT P. E., *Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions.*, SIAM Journal of Optimization, Vol. 9, Number 1, 1998, pp. 112-147
- [4] DUNCAN LUCE, R., RAIFFA, H. *Games and Decisions*, Dover, 1989.

Mejora de la pirometría infrarroja aplicada a hornos de recocido continuo

TAMI 2010 - Reporte final

Participantes: Jorge Solanes, Javier Etcheverry

Presentador del problema: Gabriel Cervellini, Diego Migliorino, Ternium.

Resumen del problema

En muchos procesos de calentamiento industrial (líneas de galvanizado continuo, producción de tubos de acero, fusión de vidrio, etc.) se debe calentar rápidamente la carga logrando al mismo tiempo un control preciso de su temperatura final. Para lograr este control es necesario medir apropiadamente la temperatura de la carga, lo que se debe normalmente realizar sin contacto (ya que la carga se traslada dentro del horno, a veces a velocidades considerables). La solución tecnológica actual consiste en utilizar pirómetros infrarrojos (instrumentos que miden la radiación en el infrarrojo que sale de la superficie de la carga en cierta dirección dada, habitualmente en un intervalo de longitudes de onda fijo, e infieren la temperatura de la superficie a partir de ella).

Esta solución dista mucho de ser óptima, por varios motivos. Uno, la radiación que sale de la superficie no es sólo radiación emitida por la superficie (que testimonia su temperatura) sino radiación reflejada desde otros puntos de la cavidad del horno. Esta radiación reflejada en muchos casos puede ser mucho más intensa que la emitida (por razones de productividad la temperatura del horno es normalmente superior a la temperatura de la carga). En segundo lugar, las propiedades ópticas de las superficies que son relevantes para esta técnica (emisividad, por ejemplo) están habitualmente mal caracterizadas y dependen mucho del estado superficial de la carga que en muchos casos es incontrolable.

La tecnología actual ha desarrollado mucho estos instrumentos, hasta el punto en que es posible medir simultáneamente la radiación proveniente de varios puntos diferentes, en varios intervalos de longitud de onda distintos.

La propuesta de este trabajo consiste en pensar cuál es la promesa de estos instrumentos mejorados para la medición de temperatura; hallar, si es posible, configuraciones de distintas direcciones de vista/distintas longitudes de onda que proporcione mediciones más precisas, robustas, etc.

Desde el punto de vista técnico, trabajar exitosamente con este problema involucraría hacer / perfeccionar modelos de los intercambios de radiación dentro de una cavidad con superficies a distintas temperaturas y con distintas propiedades ópticas; realizar análisis de sensibilidad de los parámetros que se desee medir respecto de las perturbaciones (tanto de temperaturas y propiedades de las superficies como 'errores de modelización').

Introducción

En las líneas de galvanizado continuo se aplica el revestimiento mediante la inmersión en un baño metálico correspondiente al tipo de protección (galvanizado o cincalum). Previo a esta etapa, la chapa debe pasar por un horno de recocido para producir una recristalización de los granos del acero altamente deformados en el proceso de laminación en frío.

El recocido es un tratamiento térmico que consiste en hacer seguir al acero una curva de calentamiento controlada a fin de obtener las propiedades mecánicas deseadas para cada producto según su utilización final.

Una línea de este tipo se divide básicamente en tres etapas:

- Horno de llama directa, F1 o DFF, donde se aplica directamente sobre la chapa la llama de combustión produciendo un calentamiento rápido de la misma hasta una temperatura de alrededor de 630°C. La acción térmica y mecánica de la llama también sirve para limpiar restos de aceite de laminación.
- Horno de tubos radiantes, F2 o RTF. En esta sección del horno la combustión se realiza dentro tubos que atraviesan transversalmente el horno, de tal modo que los gases de combustión no tienen contacto directo con la chapa. El calentamiento se produce por radiación en una atmósfera reductora controlada para eliminar los restos de óxidos que la superficie de la chapa pueda tener. La temperatura de la chapa al finalizar es del orden de 680°C
- Enfriamiento o Jet Coolers. Consiste en un enfriamiento del material por convección forzada de atmósfera reductora (mezcla de nitrógeno e hidrógeno) hasta una temperatura cercana a la del baño metálico de galvanizado o cincalum, 480°C para galvanizado y 590°C para cincalum.

Como control del proceso de recocido, es necesario conocer la temperatura a la salida de cada una de estas etapas. Para ello el horno cuenta con recintos intermedios lo más aislados posible de los hornos de calentamiento, donde hay instalados pirómetros infrarrojos para realizar la medición.

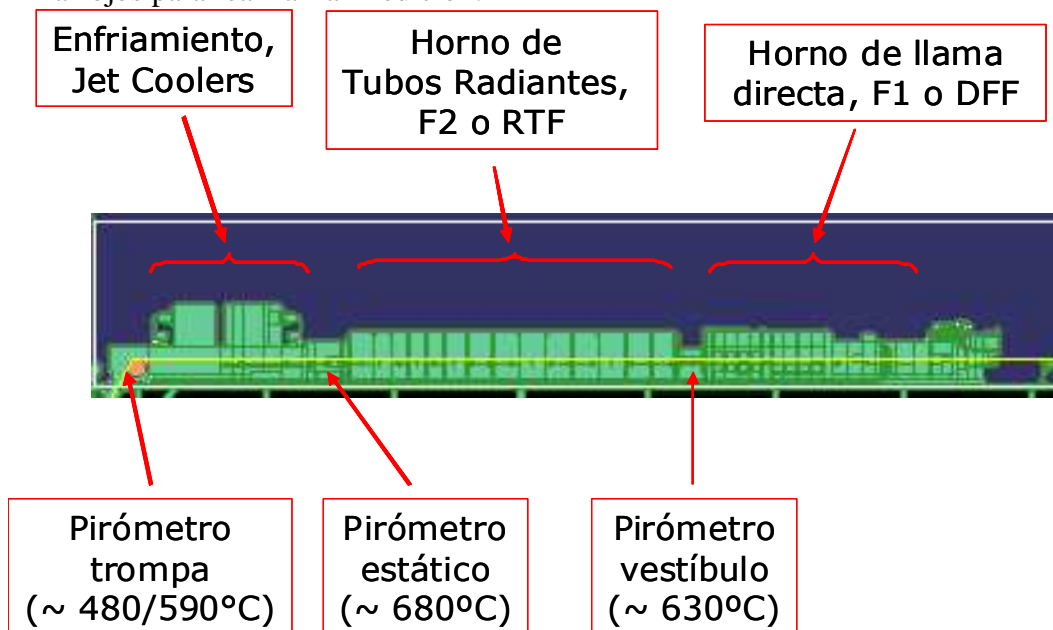


Figura 1. Diagrama de un horno de recocido continuo y sus etapas.

Resulta imprescindible entonces conocer con la mayor precisión posible la curva de temperatura aplicada sobre la chapa para asegurar la robustez del proceso, y por ende, poder garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad de cada producto.

Sin embargo no siempre se cuenta con la información lo suficientemente precisa ya que la pirometría es una técnica muy sensible a algunos factores difíciles de medir y controlar.

Estos errores de medición provocan problemas de proceso o de calidad que se traducen en un mayor costo económico de producción. Algunos de ellos son:

- Dificultad para cumplir ciclos térmicos de los distintos productos.
- Pérdidas cualitativas por defectos en revestimiento (piojillo, puntos negros) e inadecuadas propiedades mecánicas (tensión de fluencia, alargamiento a la rotura, etc).
- Desaprovechamiento de equipos cuando las temperaturas medidas por pirómetros son la variable de control de un lazo de control automático.
- Dificultades para calibrar modelos matemáticos que necesitan datos empíricos fidedignos para su puesta a punto.
- Incoherencia en variables de proceso y dificultad para encontrar su verdadera causa (excesivo consumo de aleantes, variaciones en la composición química de los baños metálicos, etc).

Pirometría

Si un cuerpo se encuentra a una temperatura superficial T emite en forma de radiación un flujo de potencia con una distribución espectral según la Ley de Planck:

$$E_{\lambda}(T, \theta, \phi) = \frac{C_1 \varepsilon(\lambda, T, \theta, \phi)}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}$$

donde,

E_{λ} es la potencia emitida en la dirección espacial dada por los ángulos θ y ϕ ,

C_1 y C_2 son las primera y segunda constantes de Planck,

T es la temperatura *absoluta* a la que se encuentra la superficie radiante.

ε es la emisividad del cuerpo, que a su vez depende de la longitud de onda, su temperatura, y la dirección de radiación,

λ es la longitud de onda de la radiación

Cabe mencionar que la emisividad de una superficie es el cociente entre la potencia emitida por ella a esa longitud de onda y temperatura, y la que emite un cuerpo negro en las mismas condiciones (emisor perfecto).

De esta ecuación se deduce que conociendo la potencia emitida a una cierta longitud de onda, y la emisividad de la superficie, se puede determinar la temperatura a la superficie T .

Utilizando la ley de Planck, y considerando el caso de un cuerpo negro, se obtiene la siguiente figura, donde se grafica la potencia de radiación emitida en función de la longitud de onda para diferentes temperaturas de superficie (dadas en °K).

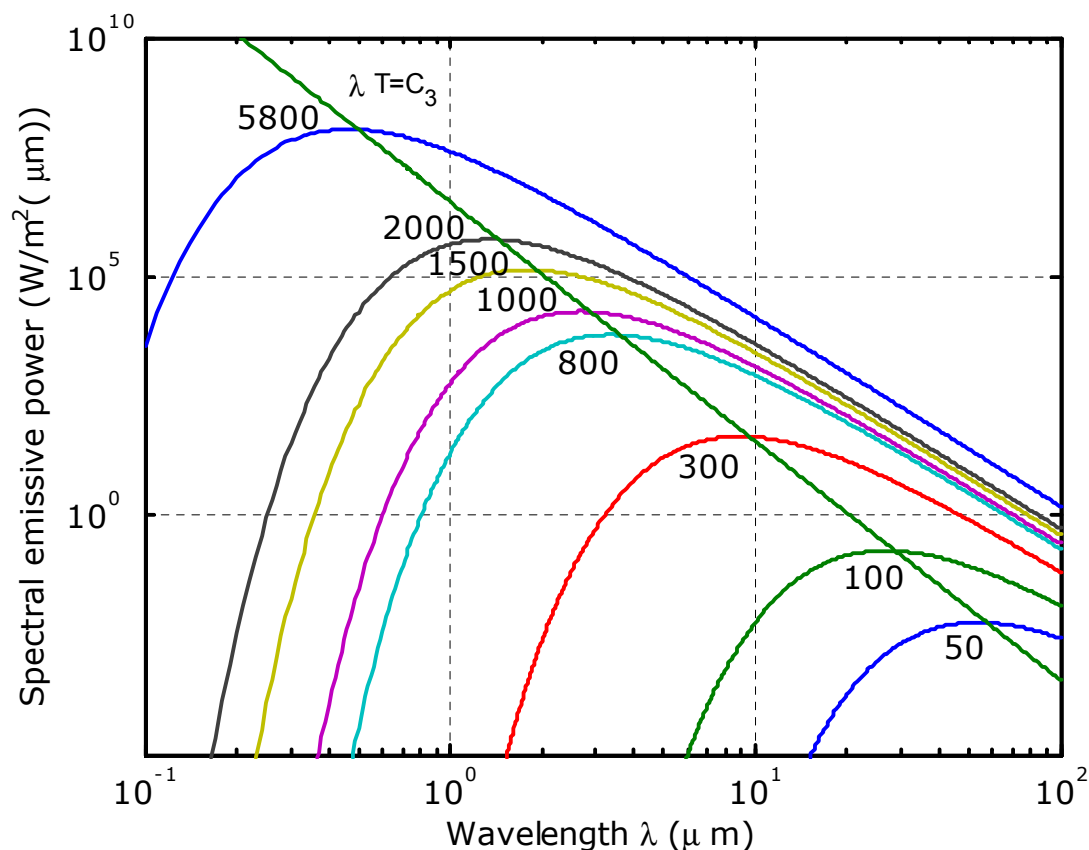


Figura 2. Espectro de radiación de un cuerpo negro.

Se observa que a mayor temperatura, el máximo de potencia se encuentra en longitudes de onda más cortas. Esta característica será de utilidad más adelante a la hora de seleccionar la longitud de onda para la medición.

Un pirómetro monocromático es básicamente un instrumento de medición que genera una señal $S(T)$ proporcional a la potencia radiante que recibe E_λ , para luego determinar la temperatura de la superficie. Para poder realizar este cálculo, el usuario debe conocer la emisividad de la superficie que se está midiendo.

En muchos casos de interés, $\exp(C_2/\lambda T) \gg 1$, por lo que en estas condiciones se puede simplificar el denominador en la ecuación de Planck, obteniendo para la señal medida por el instrumento la expresión:

$$S(T) = K \varepsilon \exp(-C_2/\lambda T)$$

En esta ecuación, la constante K está determinada por la calibración del instrumento, y la emisividad de la superficie es proporcionada por el usuario.

Suponiendo que el medio que se interpone entre la fuente y el instrumento no absorbe ni emite radiación infrarroja en el rango de frecuencias utilizado, los requerimientos básicos para una correcta medición son:

La radiación que recibe el instrumento tiene que ser emitida por el blanco y no reflejada por el mismo (radiación de fondo).

La emisividad del blanco debe ser conocida.

Radiación de fondo

Si el ambiente en el que se encuentra el blanco está caliente, el pirómetro recibe la radiación del fondo mediante su reflexión previa en el blanco. A su vez, la reflexión sobre la superficie puede ser difusa y/o especular dependiendo las características de la misma.

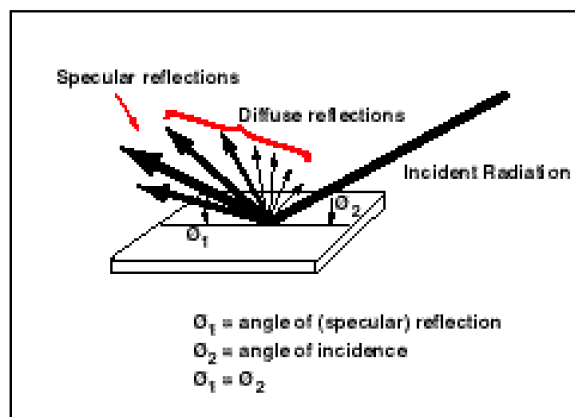


Figura 3. Reflexión del fondo sobre el blanco.

Para el caso de la chapa el porcentaje de reflexión especular varía entre 80 y 90%, mientras que el de reflexión difusa η va de 10 a 20% [1].

La radiación de fondo produce errores de medición, por lo que es importante evitarla. Existen principalmente dos formas de conseguirlo:

- Seleccionando la longitud de onda de medición adecuada para la aplicación: Se observa en la Figura 1 que no sería adecuado seleccionar $\lambda=1\mu\text{m}$ para medir un cuerpo a 800°K si el fondo se encuentra a 2000°K , ya que a esa longitud de onda el fondo emite con un orden de magnitud tres veces mayor al blanco. Es mucho más razonable seleccionar $\lambda\sim 2,5\mu\text{m}$ ya que el orden de magnitud del fondo respecto al blanco es uno.
- Proteger el campo de visión del instrumento de las reflexiones del fondo (principalmente especulares). Una solución utilizada es la de montar un tubo de vista al instrumento. Ver Figura 4.

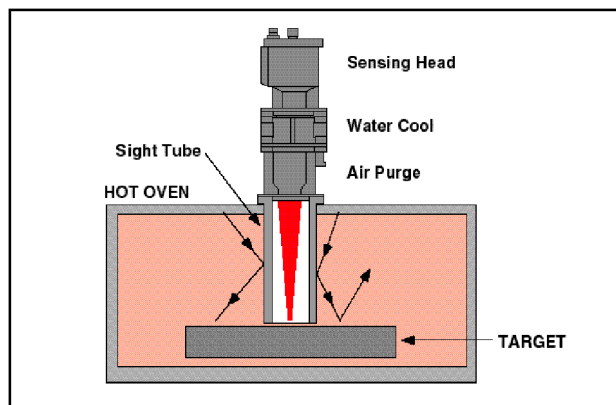


Figura 4. Tubo de vista.

Emisividad del blanco a medir

En el caso de las superficies metálicas, la emisividad en el infrarrojo suele disminuir con el aumento de la longitud de onda. Es de todas maneras una magnitud muy compleja, que varía según la rugosidad de la superficie, su textura, su limpieza, etc, todas variables difícilmente controlables en un ambiente industrial.

El error de la emisividad seteada en el instrumento respecto de la real del blanco es una de las causa los errores de lectura. Mientras menor sea el valor de emisividad, sus variaciones provocarán errores porcentuales más considerables

En general, se recomienda tomar ciertos recaudos para minimizar estos errores:

Seleccionar la longitud de onda más corta posible para tener una mayor emisividad del blanco. Como se mencionó más arriba, esto podría incrementar significativamente los errores debidos a la radiación de fondo, y por lo tanto debe hallarse una solución de compromiso.

Si se desconoce el valor de la emisividad, pero se conoce el cociente de ellas a dos longitudes de onda distintas, se puede utilizar un pirómetro bicolor.

Este tipo de instrumentos mide la potencia irradiada a dos longitudes de onda, y luego realiza el cociente de ellas [2]. De esta manera no es necesario conocer el valor absoluto de las emisividades, sino su cociente (lo que se denomina e-slope) para determinar la temperatura de la superficie. Sin embargo, estos instrumentos son muy sensibles a la radiación de fondo.

Para el desarrollo del trabajo se supondrá que la emisividad de la chapa responde a la aproximación basada en datos empíricos medidos por el proveedor LAND [1]:

$$\varepsilon_{\lambda} = \beta (1/\lambda)^{\alpha}, \quad \alpha = 0,564, \quad \beta = 0,478$$

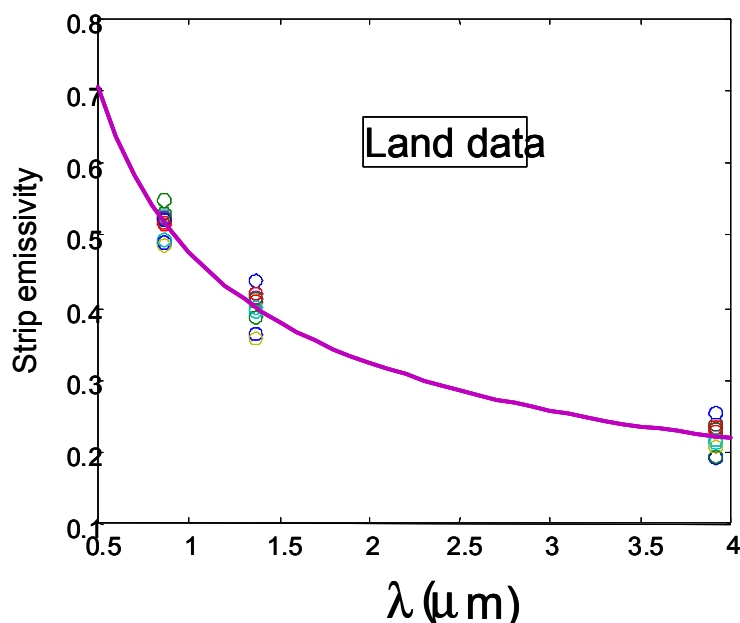


Figura 5. Emisividad de chapa de acero. Los círculos corresponden a datos empíricos reportados por el proveedor LAND, mientras que la línea continua corresponde a la aproximación analítica reportada en el texto.

Desarrollo

Ecuaciones del balance energético en una cavidad gris difusa

Las superficies que constituyen la cavidad pueden descomponerse en N porciones de área. El estado térmico de la k -ésima porción estará definido por tres variables:

T_k : temperatura de la superficie.

q_k : Potencia neta recibida/entregada por la superficie por medios no radiativos.

q_k^o : potencia irradiada por la superficie.

Planteando la condición de equilibrio radiativo del sistema, se puede llegar a un sistema de $2N$ ecuaciones de la forma:

$$q_k = \frac{\epsilon_k}{1 - \epsilon_k} (\sigma T_k^4 - q_k^o)$$

$$q_k = q_k^o - \sum_{j=1}^N F_{k-j} q_j^o, \quad k=1, \dots, N.$$

F_{k-j} es el factor de vista del elemento j respecto al elemento k , es decir cuánto de la radiación que emite k es recibida por j .

Este sistema de $2N$ ecuaciones tiene $3N$ incógnitas por lo que será necesario establecer N condiciones adicionales para que tenga una única solución. La situación típica es especificar o bien el flujo neto o bien la temperatura para cada elemento [3]. En el caso en que hay superficies no grises y/o no difusas estas ecuaciones son mucho más complejas, involucrando integrales sobre la longitud de onda y efectos direccionales. Cuando las superficies son grises y parcialmente especulares los factores de vista pueden modificarse adecuadamente para tenerlo en cuenta.

Previo al desarrollo del TAMI, se contaba con un modelo matemático que implementa este balance en algunas regiones de los hornos de recocido de las líneas de galvanizado de Canning y Haedo de Ternium, realizado bajo la siguiente aproximación. Utilizando emisividades promedio se calcula la distribución de temperaturas de equilibrio en la cavidad. Con esa distribución de temperaturas dada se calculan luego los flujos radiativos a cada longitud de onda de interés, utilizando emisividades adecuadas para dichas longitudes de onda. El cálculo de los factores de vista se realiza mediante la utilización del Método de Monte Carlo [4].

Aplicación del modelo al vestíbulo de Canning

La geometría del vestíbulo está representada en la siguiente figura:

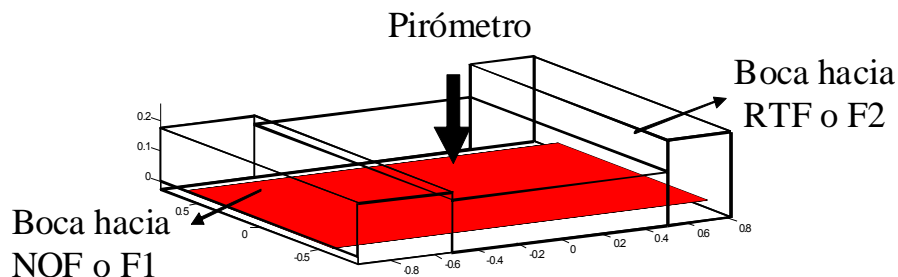


Figura 6. Geometría del vestíbulo de Canning.

La pared frontal es la apertura hacia el horno de llama directa y la trasera hacia el horno de tubos radiantes. Se considera que ambas superficies se comportan como un cuerpo negro a la temperatura correspondiente a cada horno, ya que es muy poco probable que un haz de radiación que ingrese a estos hornos vuelva hacia el vestíbulo nuevamente. Las paredes laterales, que encierran el resto del volumen, están recubiertas por refractario, por lo que se consideran adiabáticas, salvo la posición del pirómetro que cuenta con un tubo de vista refrigerado con agua ($T=25^{\circ}\text{C}$).

Como primera utilización del modelo, se supone que la chapa (superficie en rojo) está a una temperatura conocida de 630°C , y que las temperaturas de las superficies que conectan a los hornos de llama directa y tubos radiantes son 1230°C y 850°C respectivamente. A partir de estas se obtienen las temperaturas de equilibrio estacionario del vestíbulo.

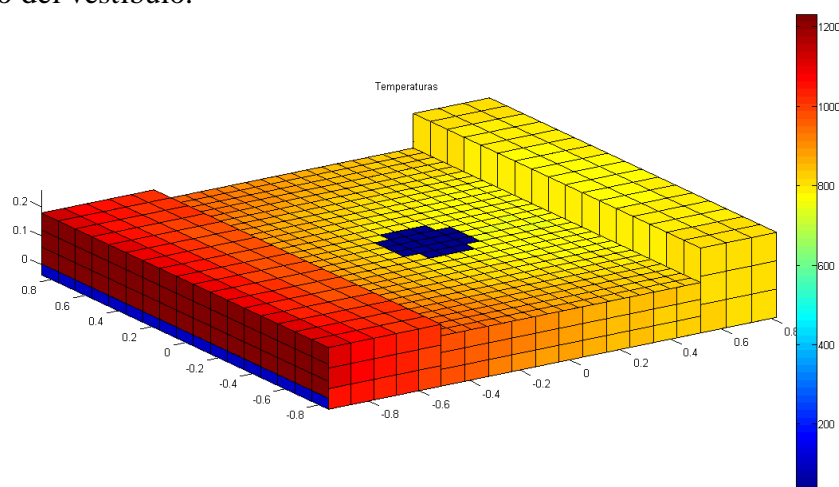


Figura 7. Distribución de temperaturas en equilibrio estacionario ($^{\circ}\text{C}$).

Conociendo la distribución de temperaturas, se puede determinar la potencia de radiación espectral que recibiría un instrumento ubicado en la posición indicada en la Figura 6. Para hacer esto, se realizaron corridas del modelo cambiando la longitud de onda y recalculando las matrices de factores de vista para cada caso (ya que la emisividad de la chapa depende de la longitud de onda). Los resultados se muestran en el siguiente gráfico (círculos azules). Se puede observar que la radiación que ingresa al tubo de vista del pirómetro tiene un máximo de potencia cerca de los $3\mu\text{m}$.

Para describir de manera simplificada el flujo incidente sobre el pirómetro se puede considerar que es la suma de la radiación propia de la chapa (a T_c) más la contribución individual de cada porción de superficie de la cavidad a través de la reflexión difusa de la radiación saliente de ella en el área de la chapa hacia adonde apunta el pirómetro (se desprecia la reflexión especular por contar con un tubo de vista):

$$S_p = \varepsilon_{c,\lambda} E_{\lambda,T_c} + (1 - \varepsilon_{c,\lambda}) \eta_c \sum_{j=1}^N q_j^o F_{j-p}$$

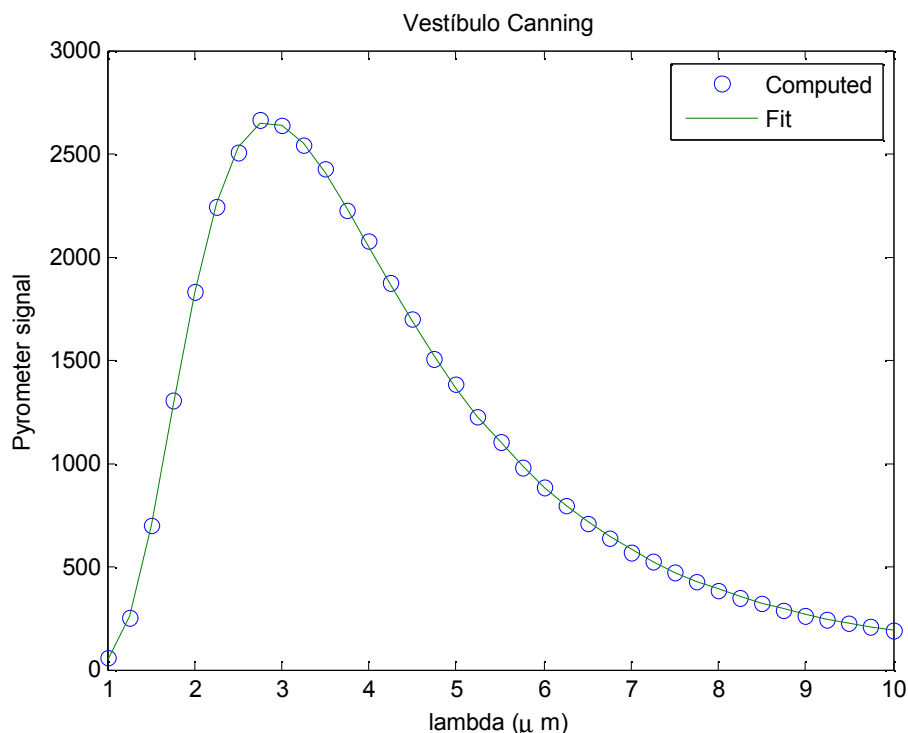


Figura 8. Señal recibida por el pirómetro en el espectro de radiación.

Una simplificación de esta ecuación sería considerar que la radiación de fondo proviene de una única superficie a una cierta temperatura T_o . Entonces la ecuación pasaría a tener la forma:

$$S_p = \varepsilon_{c,\lambda} E_{\lambda,T_c} + (1 - \varepsilon_{c,\lambda}) \eta_c E_{\lambda,T_o} F_{o-p}$$

Esto representa físicamente la composición de dos de las curvas de radiación de cuerpo negro a diferentes temperaturas, como las representadas en la Figura 2.

Se ajustó esta ecuación variando las temperaturas de la chapa T_c y del fondo T_o , y el factor de vista del pirómetro con el fondo F_{o-p} , y manteniendo los coeficientes de emisividad y reflectividad conocidos. El ajuste fue muy bueno y está trazado en la Figura 8 por la línea continua.

Las temperaturas obtenidas para la chapa y el fondo fueron 620 y 860°C respectivamente. El error de temperatura de la chapa obtenido por esta aproximación es de 10°C, es decir -1,6%. A su vez, el fondo estaría a una temperatura muy inferior a la del horno de llama directa, el cual se pensaba que era la mayor fuente de radiación de fondo en primera instancia.

Lo importante ahora sería poder cuantificar las contribuciones relativas a la radiación que ingresa al pirómetro. Esto es, saber cuál es la relación entre lo emitido y lo reflejado por la chapa proveniente de cada región de la cavidad.

Para conocer esto, en primer lugar se evaluó individualmente la contribución de cada porción de superficie $q_j^o F_{j-p}$ a la señal del pirómetro para las distintas longitudes del espectro. El resultado para longitudes de onda de 1 y 2,5 μm se observa en la Figura 9.

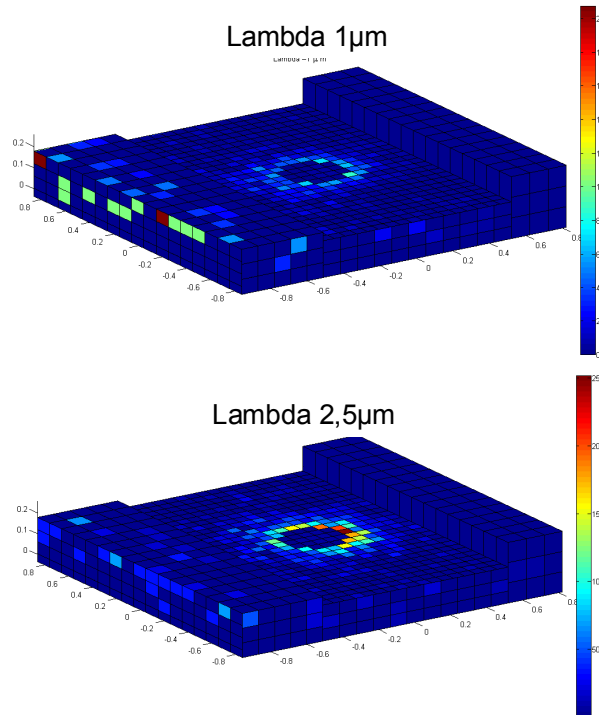


Figura 9. Contribución de los elementos del fondo a la señal del pirómetro.

Se puede apreciar que para menores longitudes de onda corta prevalece la contribución del horno de llama directa. Sin embargo, a medida que se incrementa la longitud de onda se hace evidente que la mayor contribución proviene del techo del vestíbulo, principalmente de la zona circundante el tubo de vista. Para tener una apreciación de la contribución total de cada parte, se integró la contribución sobre las tres superficies más significativas: horno de llama directa, horno de tubos radiantes y techo del vestíbulo.

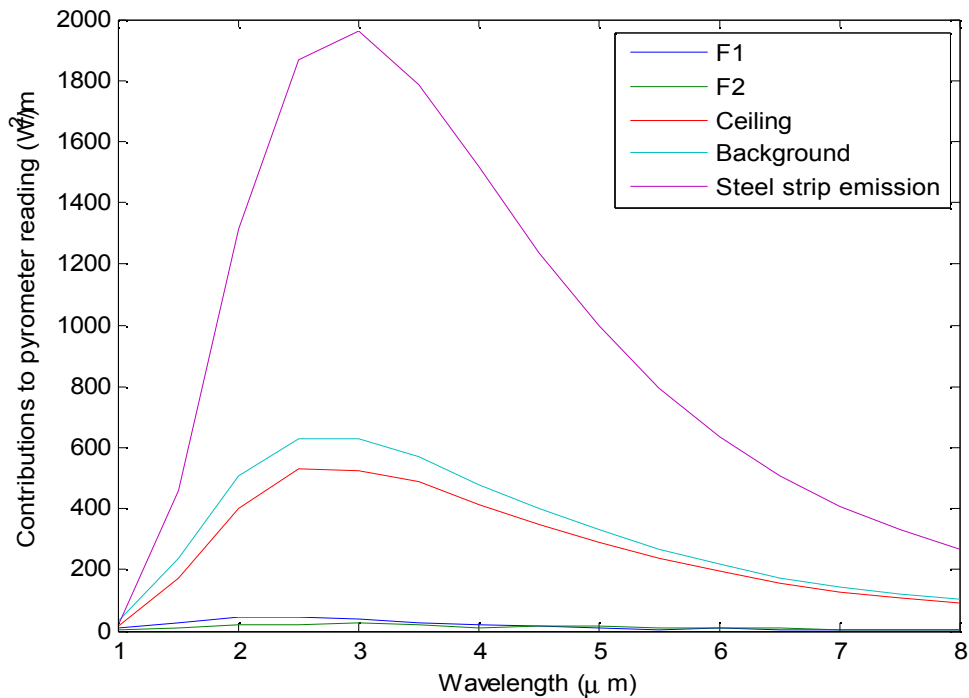


Figura 10. Contribución de las distintas superficies a la señal del pirómetro.

Se observa que, para todo el espectro, la mayor proporción de la radiación de fondo proviene del techo.

Al obtener estos resultados, el interrogante que surgió fue si se reduciría la proporción de radiación de fondo vista por el instrumento si el techo se comportase como un cuerpo negro. De ser así, se evitaría que se produzcan reflexiones de otras superficies sobre el mismo y luego terminen en el pirómetro. Pero, por otra parte, al ser un cuerpo negro absorberá toda la radiación que reciba y su temperatura de equilibrio será mayor, por lo que emitirá más.

Se realizaron las corridas correspondientes y se graficó el cociente entre la potencia que emitida por la chapa y la proveniente del fondo.

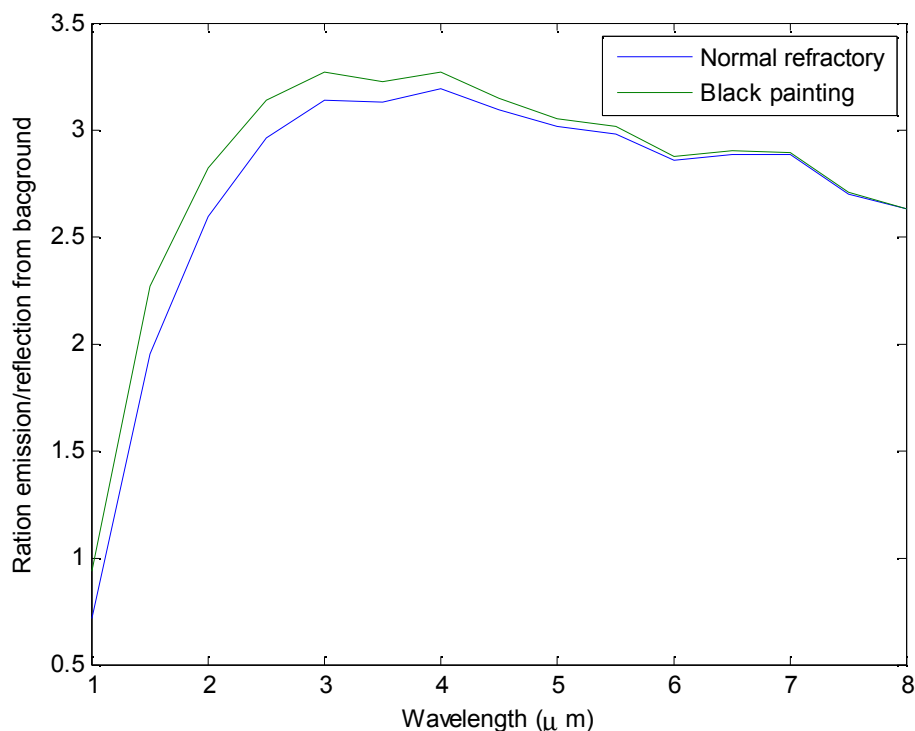


Figura 11. Cociente de contribución chapa/fondo para dos condiciones del techo.

Se observa una mejora en el cociente de contribuciones cuando el techo se comporta como cuerpo negro. A pesar de esto, no parece ser lo suficiente considerable como para justificar esta modificación.

Se concluye de esto que conviene tratar de mejorar el tubo de vista antes de pintar el techo de negro.

Aplicación del modelo al estático de Canning

Se aplicó nuevamente el modelo al recinto en el que se encuentra instalado el pirómetro del estático.

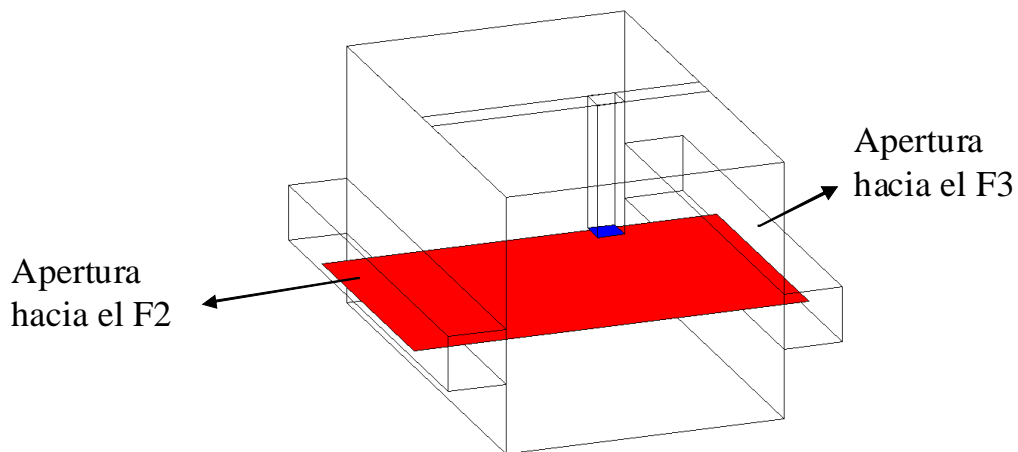


Figura 12. Recinto del pirómetro del estático.

En primera instancia se calculó la temperatura de equilibrio estacionario del recinto imponiendo las condiciones de contorno de forma similar al caso anterior.

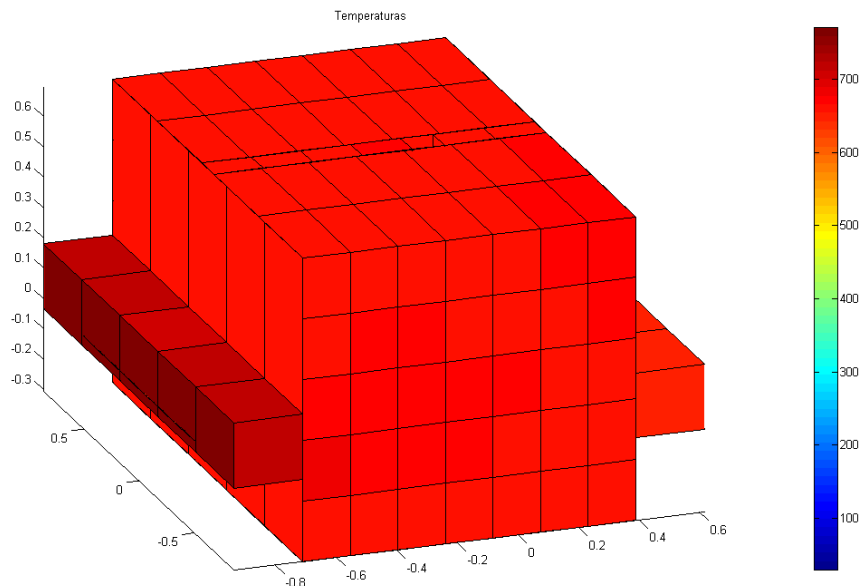


Figura 13. Distribución de temperaturas en el estático.

En este caso, se observa que la distribución de temperaturas es mucho más uniforme y cercana a la temperatura de la chapa. Esto se debe a que no se provocan cambios bruscos de temperatura de la chapa en las zonas vecinas al estático.

En esta posición de la línea, se encuentra actualmente instalado un pirómetro bicolor, que utiliza $\lambda_1=1,55\mu\text{m}$ y $\lambda_2=1,67\mu\text{m}$ aproximadamente con un e-slope de 1,056. Se intenta determinar si es adecuado instalar este tipo de pirómetro en esta posición. Para esto, se hizo variar la temperatura de la boca al horno de tubos radiantes y la temperatura de la chapa (provocando variaciones de la temperatura de equilibrio). Para cada corrida se calcularon la temperatura medida por un pirómetro bicolor y otro monocromático. Los resultados se muestran en la Figura 14, donde la recta representa la medición ideal.

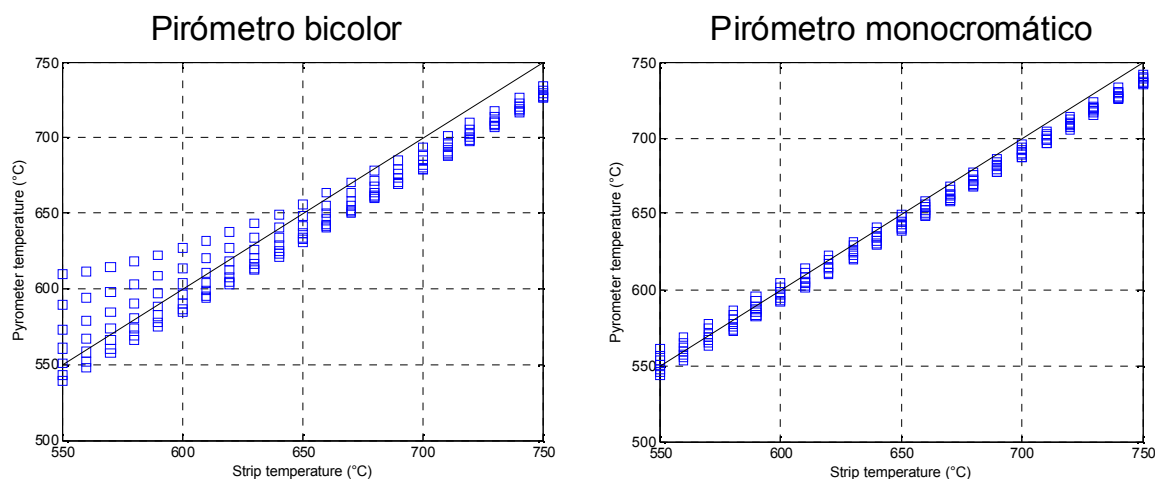


Figura 14. Comportamiento de pirómetro bicolor y monocromático en el estático.

Es evidente que la respuesta del pirómetro bicolor para una temperatura de chapa dada y diferentes condiciones de radiación de fondo tiene una variación importante, que va disminuyendo a medida que aumenta la temperatura de la chapa. La respuesta del pirómetro monocromático es en cambio mucho menos sensible a los cambios de radiación de fondo.

Conclusiones

A partir del trabajo realizado se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- La radiación de fondo vista por un pirómetro instalado en la posición vertical proviene principalmente de la zona adyacente al tubo de vista.
- Contar con la información de la radiación emitida por la chapa en distintos rangos del espectro permitiría descomponer la señal del pirómetro en la suma de una contribución de chapa y otra de fondo.
- La precisión de los pirómetros bicolors disminuye cuando la radiación de fondo es importante. Por esta razón no es aconsejable instalar este tipo de pirómetros en posiciones superiores del horno, ya que son las más expuestas a la radiación de fondo.
- El valor real de emisividad de la chapa y su variación sigue siendo un problema, que no admite un enfoque completamente teórico, y requiere posiblemente de una medición on-line.

Trabajo futuro y recomendaciones

Verificar que los instrumentos instalados sean los adecuados en función de las características de cada posición de la línea (tipo, longitud de onda, tubo de vista, posición superior/inferior, etc).

Instalar una termocupla en la zona adyacente al tubo de vista para medir la temperatura del refractario y corregir la lectura del instrumento.

Verificar el estado actual de los tubos de vista. Corroborar el buen estado del refractario que los recubre.

Analizar posibles modificaciones de los tubos de vista para disminuir la radiación de fondo vista por el pirómetro. Por ejemplo, una brida metálica de mayor diámetro en la parte inferior del mismo.

Analizar del funcionamiento de pirómetros de múltiples longitudes de onda (multi-wavelength pyrometers) y su potencial utilización en las diferentes posiciones de los hornos de recocido continuo.

Realizar un estudio estadístico de la emisividad de las chapas que se procesan en la línea según su procedencia y sus dimensiones.

Referencias:

- [1] – Land, Combustion & Environmental Monitoring. <http://www.landinst.com/>
- [2] – Theory and Practice of Radiation Thermometry, D.P. DeWitt, G. D. Nutter. Wiley, 1988.
- [3] - Thermal Radiation Heat Transfer. R. Siegel, J. R. Howell. Taylor & Francis, 4th ed., 2001.
- [4] - J. Etcheverry, no publicado.

Monitoreo Inteligente de Procesos

TAMI 2010 - Reporte final

Participantes: Ezequiel Alfie, Tomás Guozden, Mauricio Maestri, Julián Martínez, Sebastián Sosa, Daniel Ziella.

Presentador del problema: Gabriel Horowitz, YPF.

Resumen del problema planteado

El problema planteado se enmarca en una disciplina llamada monitoreo inteligente de procesos (MIP). La misma consiste en un conjunto de herramientas informáticas cuyo objetivo es la detección y diagnóstico de eventos anormales en procesos. Dentro de la industria petroquímica el diagnóstico temprano de eventos anormales es de vital importancia por la peligrosidad de los procesos involucrados. Es ilustrativo mencionar que las pérdidas anuales asociadas a los eventos anormales en la industria petroquímica de Estados Unidos ascienden a los 20.000.000.000 de dólares.

Los procesos de interés son procesos continuos que operan en estado estacionario. Los mismos son controlados por operadores en salas de control donde, desde una terminal de PC, pueden obtener información on-line de diferentes variables de proceso como así también, actuar sobre el proceso variando la apertura de válvulas. Además, existen sistemas de control automático que regulan la apertura de ciertas válvulas de control para estabilizar el proceso. El MIP pretende brindar soporte a los operadores en la tarea de diagnóstico de eventos anormales.

El método de diagnóstico de fallas planteado se basa en el seguimiento del signo de la desviación de cada variable (perturbación) como consecuencia de una determinada falla. En el paper adjunto, se muestra una técnica para determinar, a partir de las ecuaciones que describen el comportamiento de un proceso, el signo de la perturbación de cada variable frente a diferentes fallas que pueden ocurrir en un proceso dado.

El método de diagnóstico consiste en asignarle al vector de perturbaciones obtenido a partir de la medición actual de las variables de la planta, alguno de los vectores precalculados asociados a las fallas conocidas. Esto plantea dos problemas distintos. Por un lado la necesidad de automatizar la generación del vector de perturbaciones a partir del modelo analítico del proceso y por otro determinar el signo de la perturbación de cada variable a partir de la caracterización de la serie temporal y de la situación actual del proceso.

El primer problema está planteado en el paper adjunto y requiere de cierto conocimiento de los procesos involucrados y de teoría de grafos. Los interesados en el mismo pueden referirse dicho paper. El segundo es más abstracto y sólo requiere de conocimiento de series temporales. A continuación se da una breve introducción al mismo. Para determinar el signo de la variación de una variable perturbada es necesario tener en cuenta dos características del sistema en estudio. La primera es la variabilidad natural del mismo que nos permite saber si la perturbación medida es significativa o es parte del ruido natural del proceso. La segunda es el tiempo característico de los procesos asociados a dicha variable que nos indica cuanto tiempo debemos esperar para que la perturbación se haga evidente en la medición.

El segundo problema a resolver consiste en la caracterización de las series temporales de las variables medidas para poder determinar la presencia y el signo de una perturbación en cada una de ellas. Para ello se contará con datos reales de una planta petroquímica tomados a intervalos cercanos a un minuto durante un periodo de 7 años. La elección de cuál de los dos problemas se analizará quedará sujeta al interés de los participantes.

1. Introducción

El problema planteado por YPF para TAMI 2010 se enmarca en una disciplina llamada monitoreo inteligente de procesos (MIP). La misma consiste en un conjunto de herramientas informáticas cuyo objetivo es la detección y diagnóstico de eventos anormales. Dentro de la industria petroquímica el diagnóstico temprano de situaciones anormales es de vital importancia por la peligrosidad de los procesos involucrados. Es ilustrativo mencionar que las pérdidas anuales asociadas a los eventos anormales en la industria petroquímica de Estados Unidos ascienden a los 20.000.000.000 de dólares (Nimmo, 1995). Los procesos de interés son continuos y operan en estado estacionario. Los mismos son controlados por operadores en salas de control donde, desde una terminal de PC, pueden obtener información on-line de diferentes variables como así también, actuar sobre él variando la apertura de válvulas (las cuales además son reguladas por un sistema de control automático encargado de controlar el proceso).

El método de diagnóstico de fallas propuesto por Oyeleye y Kramer (1988) se basa en el seguimiento del signo de la desviación de cada variable (perturbación) como consecuencia de una determinada falla. En dicho trabajo se presenta una técnica para precisar, a partir de las ecuaciones que describen el comportamiento de un proceso, el signo de la perturbación de cada variable frente a diferentes fallas que pueden ocurrir. Dicho método consiste en asignarle al vector de perturbaciones, obtenido a partir de la medición actual de las variables de la planta, alguno de los vectores patrón precalculados y asociados a las fallas conocidas.

2. Modelos cuantitativos vs. cualitativos

Típicamente, para advertir de dónde proviene una falla, el operador genera un posible desarrollo (el cual deduce de su experiencia y conocimiento) de las fluctuaciones de cada variable al suceder la falla que el supone, luego contrasta con los datos reales. Si las variables fluctuaron como advirtió, entonces considera que efectivamente el desperfecto sucede donde pensaba. A los fines de “emular” al operador, trabajamos con una descripción cualitativa del sistema, es decir, sólo observaremos la relación entre las fluctuaciones y no el valor de cada variable.

En general, los modelos matemáticos cuantitativos para procesos continuos constan de sistemas de ecuaciones diferenciales y algebraicas. Para el caso de estacionario, dichos modelos pueden simplificarse de manera de tener sólo sistemas de ecuaciones algebraicas,

$$f(x, u, p) = \begin{pmatrix} f_1(x_1, \dots, x_n, u, p) \\ \vdots \\ f_n(x_1, \dots, x_n, u, p) \end{pmatrix} = 0 \quad x = x_0(\text{est. estacionario}) \quad u = u_0, \quad p = p_0, \quad (1)$$

donde $x = (x_1, \dots, x_n)$ representan las variables de estado, u y p son vectores con inputs y parámetros del sistema.

A su vez, esos sistemas de ecuaciones algebraicas pueden proveer información acerca del cambio cualitativo en las variables del sistema que se producen a partir de determinadas perturbaciones. Las interrupciones o desperfectos pueden ser representadas por perturbaciones de los inputs u o los parámetros p , en ese caso el cambio en el sistema podemos describirlo matemáticamente como

$$\int_{x_0}^{x_1} \frac{\partial f}{\partial x} dx + \int_{u_0}^{u_1} \frac{\partial f}{\partial u} du + \int_{p_0}^{p_1} \frac{\partial f}{\partial p} dp = 0$$

y utilizando el teorema del valor medio,

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial f}{\partial p} \Delta p = 0.$$

Dado que buscamos ecuaciones que nos den sólo vínculos entre los aumentos o disminuciones de cada variable al suceder alguna interrupción o desperfecto sin necesidad de saber los valores reales de las derivadas y de las fluctuaciones, aplicamos la función signo $[\cdot]$ a cada ecuación obteniendo,

$$\left[\frac{\partial f}{\partial x}\right] [\Delta x] + \left[\frac{\partial f}{\partial u}\right] [\Delta u] + \left[\frac{\partial f}{\partial p}\right] [\Delta p] = 0.$$

Esta última ecuación precisa de la información del signo de cada una de las derivadas parciales, de las que no disponemos, por lo que nos restringiremos a una región C definida por inecuaciones, en donde el signo de cada una de ellas permanece igual que en los estados iniciales. Típicamente esa información es obtenida de conocimientos previos del proceso en cuestión.

Esto nos permite construir una base de datos con los patrones de signos correspondientes a cada perturbación. Durante el monitoreo de la planta, pueden compararse los cambios en las variables de operación con los registros en dicha base de datos, y dada una coincidencia, inferir a partir de los mismos cuál es la falla o perturbación que existe en la planta. Si bien se pierde información al utilizar solamente el signo de las perturbaciones, resulta conveniente frente al costo de calibrar y mantener un modelo cuantitativo.

3. Modelos cualitativos: soluciones

Si se reduce el problema, ya no a determinar las perturbaciones sino sólo su signo, el problema puede resolverse algebraicamente en un conjunto de cuatro elementos $\{1, -1, 0, ?\}$ con las operaciones operaciones suma y producto definidas por

+	-1	0	1	?	*	-1	0	1	?
-1	-1	-1	?	?	-1	1	0	-1	?
0	-1	0	1	?	0	0	0	0	0
1	?	1	1	?	1	-1	0	1	?
?	?	?	?	?	?	?	0	?	?

puede verse que estas operaciones son conmutativas, asociativas y que el producto distribuye respecto de la suma.

Una primera observación respecto del sistema de ecuaciones cualitativas es que, aún en el caso de que estas provengan de un sistema de ecuaciones determinado, este no tiene solución única.

Otra observación útil es que, si se agregan ecuaciones (claramente dependientes) al sistema original, al reducirlo a ecuaciones cualitativas, el sistema redundante puede tener menos soluciones. Eventualmente, el sistema puede estar determinado. Luego, es importante agregar redundancia al sistema antes de reducirlo a su versión cualitativa.

Cabe preguntarse, entonces, qué ecuaciones agregar y cuáles no aportan nueva información al sistema. La respuesta está en incluir reglas de operación entre ecuaciones cualitativas consistentes con alguna operación en el sistema original.

En un sistema lineal vale que

$$\begin{array}{rccccccc} a_1x_1 & + & \dots & + & a_nx_n & = & c_1 \\ b_1x_1 & + & \dots & + & b_nx_n & = & d_1 \\ \hline (\lambda a_1x_1 + b_1) & + & \dots & + & (\lambda a_nx_n + b_n) & = & \lambda c_1 + d_1 \end{array} \quad (2)$$

que eligiendo $\lambda = -\frac{b_k}{a_k}$ permite obtener un cero en el sitio k (si $a_k \neq 0$). Se puede, entonces, extender el álgebra a los sistemas de ecuaciones cualitativas de manera de permitir el equivalente a la ecuación 2. Luego una operación válida entre ecuaciones cualitativas permite (análogamente a la versión lineal) obtener un coeficiente nulo y en el resto de los sitios, operar con el álgebra cualitativa habitual: en caso de obtenerse un “?”, esa ecuación no aporta información alguna al sistema y puede ser eliminada sin pérdida.

Cabe mencionar que no es un buen método, en el álgebra cualitativa, la triangulación. La operación de reemplazar una ecuación por otra como en 2 no necesariamente es reversible. Luego, el sistema derivado no es necesariamente equivalente al original. Además, aún un sistema triangular y sin ceros en la diagonal, no es necesariamente inversible. Por lo tanto, lo mejor que puede hacerse, en el sentido de invertir el sistema, es realizar operaciones de triangulación pero agregando ecuaciones en vez de reemplazarlas.

Como ya se dijo, agregar ecuaciones al sistema lineal antes de pasar al sistema cualitativo puede agregar información. Esto da lugar al desarrollo de heurísticas diseñadas al efecto. En vez de eso, puede explotarse el hecho de que el tamaño típico de un problema real (industrial) es de alrededor de $n = 100$ variables. Luego y sabiendo que la información acerca de los coeficientes es escasa, se puede agregar todas las ecuaciones derivadas de operar sobre dos ecuaciones originales obteniendo un cero en cada sitio. Esto da un total de, como máximo, $\sim n^3$ ecuaciones extra¹. Este método, aplicado a casos sencillos, obtuvo las mismas ecuaciones que las heurísticas sugeridas en la literatura del tema.

¹Si se tiene en cuenta que el sistema es ralo, el número de ecuaciones extra es $\sim n$.

Uno de los méritos de este método radica en la posibilidad de sistematizar la obtención de nuevas ecuaciones reduciendo el trabajo humano. Otro es que dada toda la información conocida de los coeficientes permite obtener toda la información posible del sistema y sin depender de heurísticas.

4. Análisis de las series temporales

Resuelto el problema de tener identificados posibles patrones en las fluctuaciones de cada variable al suceder cada posible falla, buscamos automatizar la generación de un vector de perturbaciones que represente el estado actual de la planta para así, contrastando ambos, inferir de dónde proviene la falla.

Este problema requiere de cierto conocimiento de los procesos involucrados. Para determinar el signo de la variación de una variable perturbada es necesario tener en cuenta dos características del sistema en estudio. La primera es la variabilidad natural del mismo que nos permite saber si la perturbación medida es significativa o es parte del ruido natural del proceso. La segunda es el tiempo característico de los procesos asociados a dicha variable que nos indica cuánto tiempo debemos esperar para que la perturbación se haga evidente en la medición.

Para realizar el análisis previamente comentado contamos con el promedio horario de 55 variables de una planta de metanol de YPF (temperatura, presiones, flujos y niveles) durante un período de aproximadamente 4 años. Una primera observación de las variables nos hace ver que cada una de ellas varía alrededor de un valor medio dado con un ruido característico, que sería deseable encontrar. Vemos además que el tiempo característico de transición en cada variable no supera las 5 horas.

El ancho característico de este ruido (σ) fué estimado tomando la mediana de las desviaciones estándar de los datos en ventanas de 10 a 20 horas.

Detectamos los instantes en donde ocurrió una transición en cada una de las variables, calculando para cada tiempo la diferencia

$$x_i - M_i, M_{i+1} = \text{mediana}(x_{i-m}, \dots, x_m), x \text{ serie temporal.}$$

Si el valor absoluto de dicho valor supera un umbral dado ($\beta = 3\sigma$) entonces consideramos que sucedió una transición. Cabe destacar que todos los cálculos sólo precisan datos del pasado, característica que permite realizar todo de forma on-line en la planta.

La razón por la que utilizamos la mediana es porque es un estimador robusto de las variables, es decir, no varía excesivamente cuando hay un dato fuera de régimen. Veamos un ejemplo en la figura 1. Allí comparamos cada uno de los datos con el valor medio y la mediana, tomados en una ventana de 11 datos centrada en el mismo. Vemos en la figura que la mediana sigue el valor de los datos notablemente, al contrario que el valor medio de los mismos.

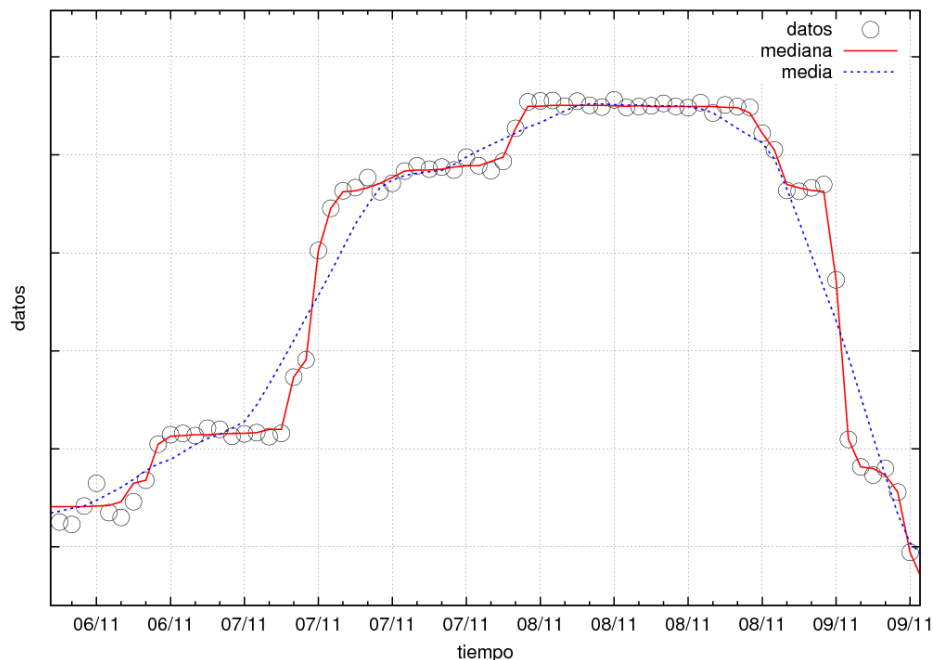


Figura 1: Comparación entre la media y la mediana, tomando ventanas de 11 datos.

Utilizamos, entonces, este estimador para encontrar los momentos en los que hay una transición en la planta y ocurre un cambio de estado en las variables. En la figura 1 la mediana está calculada en una ventana de 11 datos centrada en el tiempo dado, de modo que calcular con los 11 datos anteriores es simplemente un corrimiento de la mediana respecto de los datos como vemos en la figura 2.

Luego, para aquellos valores que se alejan por encima de un ruido característico dado (curvas amarillas en el gráfico) se supone una transición en el estado de la planta.

Este método es bueno para predecir cuándo comienza la transición que es lo que nos interesa. Desafortunadamente sobrestima el tiempo que demora la transición, identificando como transitorios (en verde) algunos puntos en que ya se estableció el estacionario. Sin embargo como dijimos, esto no es un problema mayor para nosotros ya que sólo queremos saber el momento en que ocurre la transición.

Utilizando este método identificamos las transiciones de las 55 señales de la planta con que contamos en la figura 3. Allí graficamos en blanco los instantes de transición de cada variable, de la misma manera que graficamos en verde los instantes en la figura anterior.

5. Filtro exponencial adaptativo

Algunas de las desventajas del método de detección de transiciones por medio de la mediana sobre una ventana móvil de tamaño fijo son

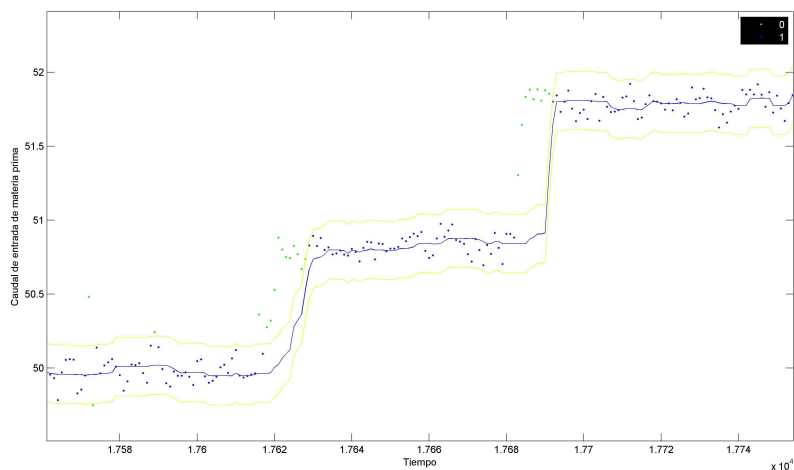


Figura 2: Los puntos corresponden a los datos medidos y la línea azul a la mediana de los 11 datos anteriores al tiempo dado. Cuando los puntos se alejan de la mediana una distancia mayor al ruido característico de la señal (curvas amarillas) consideraremos entonces que los datos corresponden a una transición y los graficamos en verde.

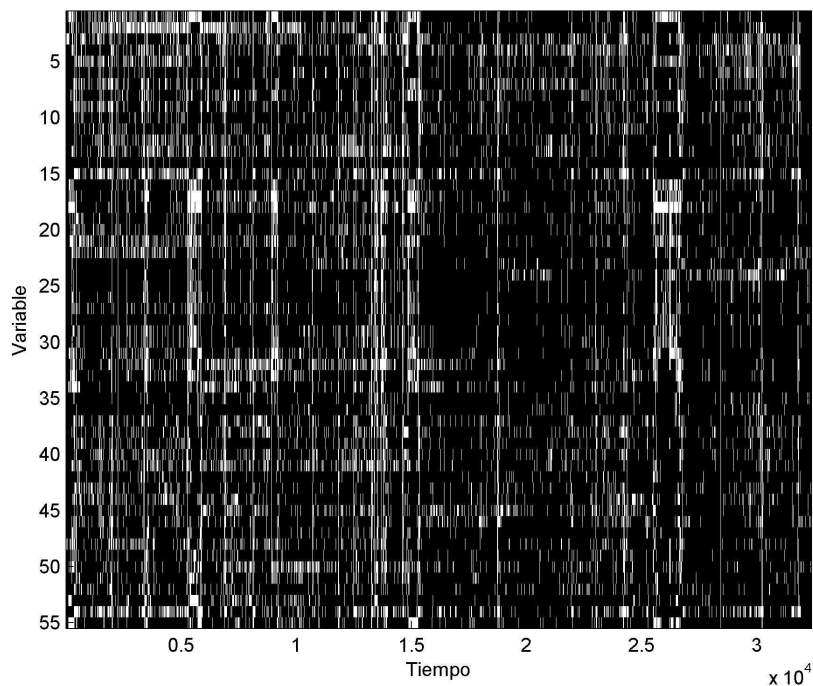


Figura 3: En blanco los instantes en que ocurrió una transición en alguna de las 55 variables.

- La señal filtrada necesariamente está retrasada en un medio del tamaño de la ventana.
- Para detectar variaciones hay que considerar dos señales: la original y la filtrada.
- Relativamente alto costo computacional de la implementación (cálculo de la mediana, mantenimiento de la ventana móvil).

Con el objetivo de sortear estas desventajas, se propuso el siguiente método.

Dada una señal ruidosa x_i consistente en una señal objetivo constante con un ruido aditivo superpuesto de ancho característico conocido se define

$$y_{i+1} = \alpha y_i + (1 - \alpha)x_{i+1}. \quad (3)$$

Puede verse, tomando esperanza a ambos lados y bajo los supuestos de que todos los x_i tienen la misma esperanza $E(x_i)$ y en estado estacionario ($E(y_{i+1}) = E(y_i)$) que $E(y) = E(x)$.

Un razonamiento similar conduce a la relación de las varianzas

$$\text{var}(y) = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \text{var}(x) \quad (4)$$

Esta relación provee de un criterio para la elección del α de manera tal de disminuir tanto como se desee la varianza (ancho del ruido) de la señal original. Así, si se quiere disminuir el ancho del ruido alrededor de la señal objetivo en un factor $\frac{1}{n}$ se llega a la expresión

$$\alpha = \frac{n - 1}{n + 1}. \quad (5)$$

Cabe notar que la misma reducción se habría alcanzado filtrando con la media sobre una ventana móvil de tamaño fijo n , es decir $y'_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{i-j}$. Luego y aunque el filtro dado por y_i involucra con pesos no nulos a todos los x_j con $j < i$, diremos que el filtro y_i , hecha la elección de α dada por (5) es *equivalente* a tomar la media sobre una ventana de tamaño n .

La manera de lograr que este filtro detecte transiciones es esencialmente la misma que la utilizada con el método de la mediana descripto previamente. El método se reformula

$$y_{i+1} = \begin{cases} \alpha y_i + (1 - \alpha)x_{i+1} & \text{si } |x_{i+1} - y_i| < \beta \\ x_{i+1} & \text{si no.} \end{cases} \quad (6)$$

Todavía hay algo por modificar este método: hasta aquí, inmediatamente después de hallar una transición, el método descripto da un peso (α) muy grande al último punto. En términos de la mencionada *equivalencia* entre el filtro exponencial y una media sobre una ventana de tamaño n , se está pesando al último punto como si fuera el el valor histórico de la señal en una ventana de tamaño n . En la práctica esto se nota en que la señal filtrada tarda del orden del tamaño de la ventana *equivalente* en alcanzar un nuevo estado estacionario. La solución propuesta es, en los momentos en los que se encuentra una transición, fijar $\alpha = 0$ ($n = 1$) e ir aumentándolo siguiendo la prescripción dada por 5 incrementando n de a 1 por paso.

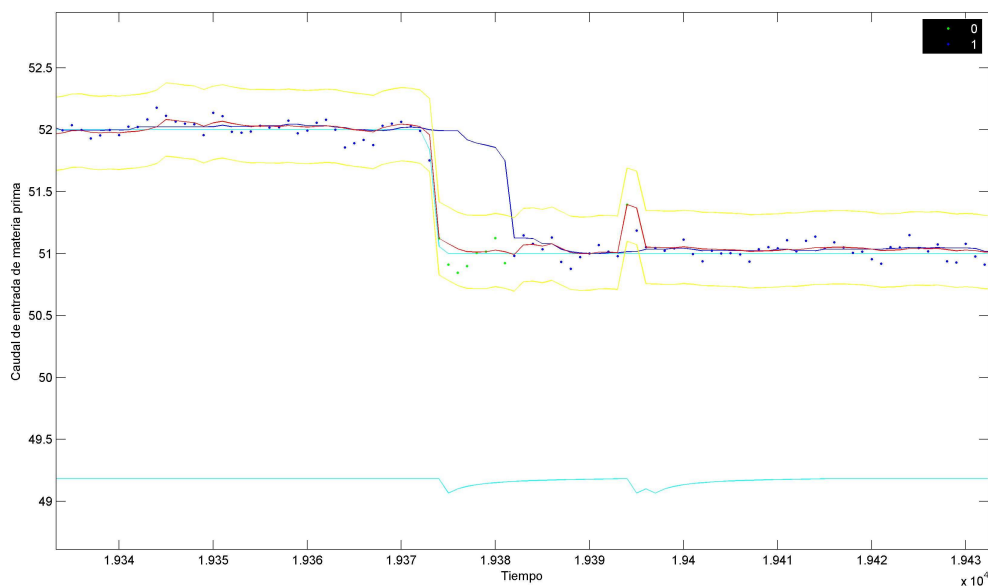


Figura 4: Fragmento de señal filtrada por distintos métodos. En rojo el filtro exponencial adaptativo. En azul la mediana sobre ventana móvil. Abajo, en celeste, el valor de α (en escala arbitraria).

6. Tiempo característico: Primeros pasos

Recordemos que nuestro objetivo es poder identificar modificaciones en el estado estacionario de la planta, ya sea que estas se deban a una falla o la decisión del operador, y posteriormente la identificación de un cambio mediante la comparación del patrón obtenido con la base de firmas. Una de las dificultades previamente mencionadas es: cada vez que se genera una transición identificar cuánto tiempo debemos esperar para ver reflejado el cambio en cada variable y así obtener un mejor patrón de signos que el resultante de realizar una comparación instantánea del estado de cada una de las variables. A este tiempo lo llamamos Tiempo Característico, y para cada variable depende del lugar donde se originó la perturbación al estado estacionario, así como de la magnitud de la perturbación.

Para entender el problema supongamos que tenemos señales puras, sin ningún tipo de ruido y que la única perturbación posible proviene del cambio en una señal de entrada.

En tiempo 0 detectamos una transición en la señal de entrada; la variable 1 inmediatamente refleja el cambio, la variable 2 recibe información de la transición recién en tiempo 1 y la variable 3 modifica su estado 3 tiempos después.

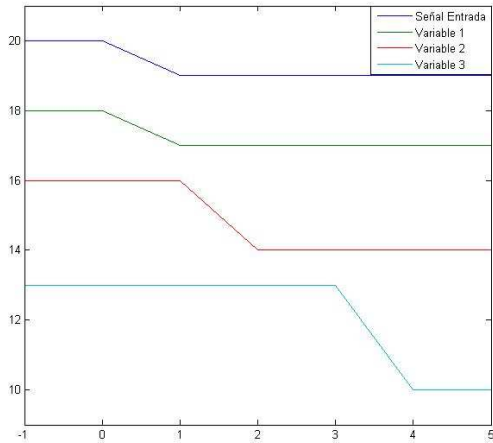


Figura 5: Cambios supuestos en las variables al variar la señal de entrada

Iniciamos nuestro análisis habiendo elegido una variable de entrada (setpoints del operador) y estudiamos con los datos históricos donde sólo tuvo una transición este setpoint, cómo responden las distintas variables.

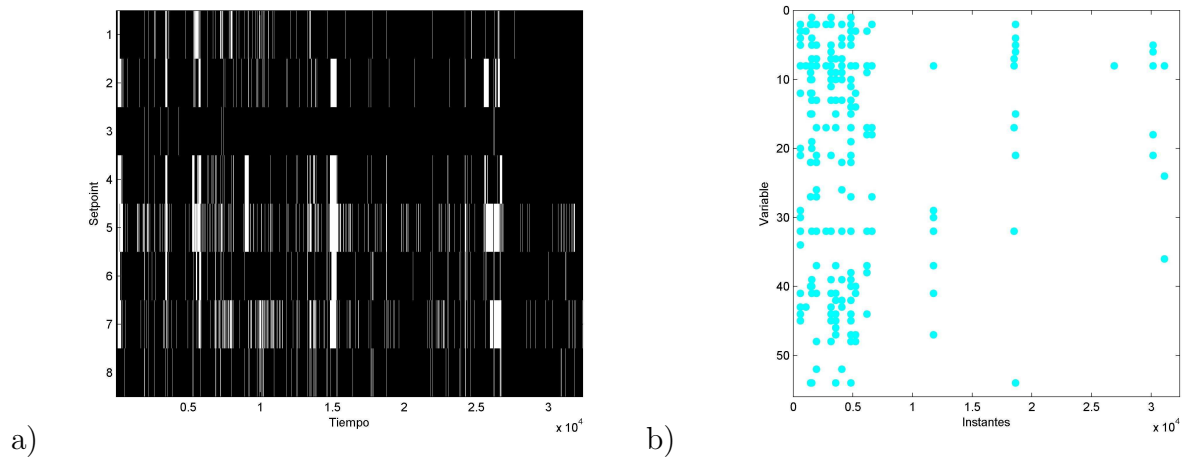


Figura 6: En el gráfico a) mostramos en blanco los tiempos en los que ocurrió un cambio en alguno de los 8 setpoints de la planta. En b) separamos de la figura 5 sólo aquellos casos en los que ocurrió un cambio en el setpoint número 5 solamente.

Graficando solamente estos tiempos nos queda el siguiente gráfico:

En este gráfico tenemos para las 55 variables, 19 transiciones que ocurrieron en el lapso de 1 hora (blanco es que ocurrió una transición) desde que varió solamente el setpoint elegido. Podemos observar que la variable 4 corresponde a una medición que se realiza inmediatamente después de donde se encuentra nuestro setpoint.

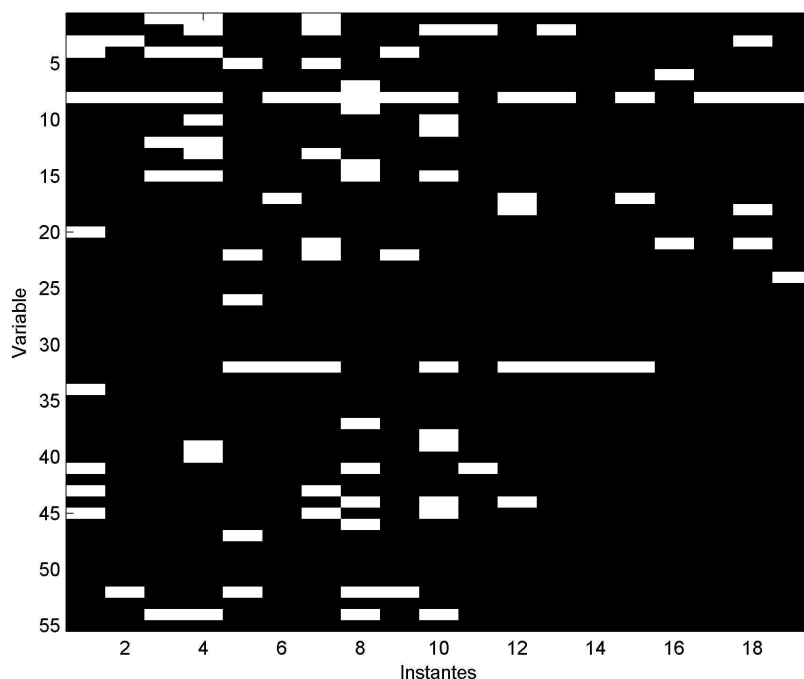


Figura 7: Cambios supuestos en las variables al variar la señal de entrada

La siguiente pregunta que se nos presentó fue: ¿Cómo es el cambio de signo de cada variable en relación al de la perturbación?

Para intentar analizar esto hicimos otro gráfico donde el fondo rojo corresponde a una perturbación que baja el nivel y el azul a una que lo sube. Poder observar esto nos brinda un criterio adicional al momento de definir qué variables tener en cuenta, ya que una variable que responde de forma aleatoria a perturbaciones de suba o baja nos agrega ruido al momento de comparar con las firmas.

7. Conclusiones

- Se logró una mejor comprensión de un método que no se encontraba en funcionamiento y tiene perspectivas favorables por lo técnicos: se hicieron avances significativos hacia una implementación.
- Se trabajó exitosamente en un grupo intersicpilinario explotando al máximo las habilidades individuales en el planteo y resolución de un problema con facetas tanto puramente teóricas como aplicadas.
- Se logró avances significativos tanto en el problema de la obtención de las firmas de fallas como en su detección a partir de una serie temporal.

Algunas asignaturas pendientes:

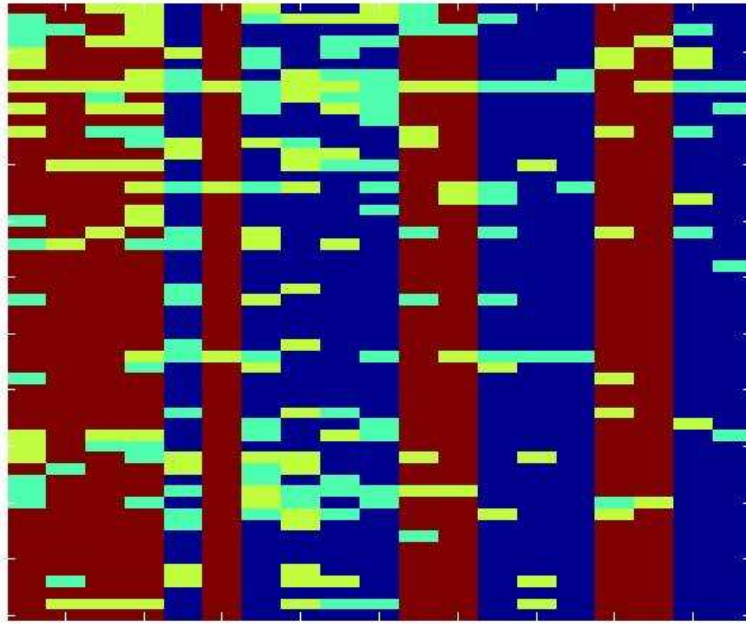


Figura 8: Misma figura que 7, sólo que comparando los signos de la transición de cada variable con el signo del cambio en el setpoint.

- Análisis de la Influencia de la magnitud de la perturbación en los tiempos característicos de cada variable.
- Generalización del método para la detección de tiempos característicos.

Bibliografía

Nimmo, I. Adequately address abnormal operations. Chem. Eng. Prog. 1995, 91, 36-45.

Oyeleye, O. O., & Kramer, M. A. (1988). Qualitative simulation of chemical process systems: steady state analysis. American Institute of Chemical Engineers Journal 34 (9), 1441-1454.

Opiniones vertidas por los participantes industriales

“Como asistente a la primera edición del TAMI, quisiera compartir la experiencia para que, en caso de necesitarla, puedan aprovecharla en próximas ediciones.

El taller reúne durante cinco días a representantes de la industria y a alumnos de grado y posgrado de física y matemática. Los representantes de la industria llevan al taller problemas matemáticos que necesitan resolver en su tarea laboral y coordinan a un grupo de alumnos para solucionarlos en conjunto. Los temas planteados en esta edición, fueron desde la optimización logística hasta el modelado de hornos pasando por la exactitud en la determinación de temperaturas.

En mi caso llevé dos problemas sobre monitoreo inteligente de procesos, uno de los cuales había sido resuelto en forma parcial por uno de los mejores investigadores del mundo en este tema. *Durante el taller se llegó a una solución mucho más formal y completa que la previamente conocida, lo que permitirá automatizar el proceso usando una computadora.* Como se imaginarán, este resultado supera por mucho mis expectativas iniciales. Sin duda recomiendo enviar problemas a la próxima edición del TAMI.

Más allá de los excelentes resultados obtenidos, el proceso de formalizar el problema para que pudiera ser entendido por los estudiantes de matemática y física, fue lo más productivo. Este resultado en sí mismo, me permitió ver el problema desde una nueva perspectiva que abre la puerta a soluciones originales.

En definitiva, el TAMI es una excelente oportunidad de estrechar lazos con el sistema científico, abrir la mente escuchando visiones originales de nuestros problemas y encontrar soluciones a un bajo costo y en poco tiempo. Espero que ese mail les resulte útil y que los anime a participar de la próxima edición del taller.”

Gabriel Horowitz
Especialista en Síntesis y Procesos
Centro de Tecnología Argentina
YPF

“El transporte de Caña de Azúcar desde los productores en el campo hasta los ingenios para su procesamiento es un problema complejo. Una solución realista para el problema requiere tener en cuenta una gran cantidad de aspectos diferentes y restricciones a respetar.

A pesar de la importancia económica de esta actividad para la región, en la actualidad la plantación, cosecha y transporte de la caña no presenta planificación alguna. Esta situación, agravada por otros elementos socio-económicos (mal mantenimiento de los vehículos, etc.), reduce claramente la rentabilidad de la actividad tanto para productores como ingenios. Sin embargo, este balance negativo no se reduce a lo económico ya que impacta en el medio ambiente (recorridos extensos con vehículos inadecuados, excesivamente cargados, etc.), seguridad vial (aumento del tráfico pesado a baja velocidad en rutas altamente transitadas), solo para mencionar algunas.

Para tener una idea de la dimensión e importancia del problema podemos citar la iniciativa actual para incentivar la producción de Biocombustibles, especialmente Bioetanol. Una cuenta rápida muestra que debido a la ineficiencia en el transporte de la caña, el gasto efectuado en producir el Alcohol necesario es superior al ahorro potencial introducido por el uso del Bioetanol (estimado en un 5%).

En este contexto, cualquier mejora que se logre puede resultar en grandes impactos, tanto en consumo de combustible, medio ambiente, economía, y los diversos aspectos logísticos y de producción relacionados a la industria del azúcar de caña.

Se formó un grupo de trabajo destinado al estudio de este problema dentro del TAMI 2010, formado por 10 investigadores, entre estudiantes de grado, licenciados en Matemática, y los proponentes del problema. A este equipo se le propusieron 2 objetivos: Por un lado, mejorar los modelos matemáticos existentes para la modelación del crecimiento de la caña de azúcar (con el objetivo de mejorar el manejo agrícola de la misma y la evaluación del impacto de diferentes escenarios como sequía, heladas, enfermedades, etc.). Y por otro lado, la optimización del transporte de la caña de azúcar, desde los cañeros hasta el Ingenio. Se estimaba que el problema era NP-completo.

El grupo de trabajo se dedicó al problema con entusiasmo y energía, dedicándole más de 9 horas de trabajo intenso por día, durante los 5 días del congreso. Los resultados obtenidos en ambos problemas son alentadores ya que se probaron varios caminos, anotándose los más prometedores para continuarlos. Varios enfoques resultaron muy originales y el ahorro en tiempo futuro es significativo.

En el segundo problema, se consiguieron resultados especialmente alentadores, ya que se lograron reducciones de complejidad significativas: se logró encontrar, programar, y probar en casos de prueba, un algoritmo P que soluciona este problema para t fijo. El programa desarrollado resolvió satisfactoriamente los ejemplos planteados. Asimismo, se planteó la estrategia a seguir para resolver el problema para todo t .

En resumen, el grupo obtuvo excelentes resultados para este problema, logrando no solo avances significativos sino además explorar otras posibles vías de solución, y los caminos posteriores a seguir.”

Dr. Adrián Will
Universidad Nacional del Tucumán.

El Taller de Matemática Industrial, TAMI, nació básicamente como iniciativa de Javier Etcheverry, Docente del Departamento de matemática de la Facultad de ciencias exactas de la UBA e investigador del CINI, tratando de imitar en cierta medida experiencias exitosas de este tipo en países desarrollados como EEUU, donde la matemática tiene un rol más importante en la industria, especialmente en aquella que prepondera la innovación tecnológica.

La idea consiste en poner a trabajar en el análisis y resolución de problemas industriales reales a estudiantes avanzados y graduados de Matemática y Física.

(...) nosotros (Ternium Siderar) participamos presentando un problema para discusión de Mejora de la pirometría infrarroja aplicada a hornos de galvanizado. Asimismo un JP en rotación en el sector (Solanes) formó parte de uno de los grupos de análisis.

En nuestra opinión (y creo que es generalizado a juzgar por los testimonios escuchados en la reunión de cierre), la experiencia fue por demás exitosa y útil para ambas partes, los matemáticos y físicos porque pudieron tomar contacto con problemas reales y someter sus ideas a discusiones fuera del ámbito netamente académico, y los industriales porque nos encontramos con enfoques a los problemas muy libres de los prejuicios y condicionamientos que muchas veces implica estar “adentro” del problema, y a la vez el hecho de sacar la discusión de las urgencias del día a día puede permitir hallar soluciones más solventes e integrales. Por otro lado, considero que el taller también contribuyó al objetivo de acortar la brecha entre Industria y Universidad.

En nuestro caso concreto de la línea de galvanizado de HDG2 se llegó a la conclusión, por ejemplo, que en dos de las ubicaciones del horno no se están utilizando pirómetros de la tecnología apropiada para las condiciones a los cuales están sometidos. A la vez quedó abierto el camino hacia investigaciones futuras sobre cómo minimizar las variaciones de emisividad de la chapa y el estudio de factibilidad de la utilización de pirómetros multiwavelength. Los grupos van a emitir un informe sobre el trabajo hecho durante el taller, con lo cual vamos a tener información más detallada sobre el tema.

Gabriel Cervellini
Ingeniero de Procesos,
Ternium-Siderar