



Simulación numérica de un intercambiador de calor de placas

Por **Aline da Costa, Ricardo A. Medronho**

Departamento de Ingeniería Química, Escuela de Química / UFRJ

Washington de O. Geraldelli

Cenpes/Petrobras

Los intercambiadores de calor de placas son equipos de fácil mantenimiento y limpieza. Su diseño modular los hace muy flexibles y, debido al arreglo de las placas corrugadas, en él se generan esfuerzos cortantes que disminuyen la deposición sobre las placas. Los intercambiadores de calor que usan placas completamente soldadas pueden ser operados a altas temperaturas y presiones y también pueden operar con hidrocarburos por no poseer juntas entre las placas. Estas características hacen que este tipo de intercambiadores sea recomendado para servicios con fluidos corrosivos que presentan un alto grado de suciedad y alta viscosidad, y justifica su creciente uso en la industria del petróleo. En este trabajo se expone la rea-

lización en la cual un intercambiador de calor con placas totalmente soldadas, modelo Compabloc de Alfa Laval, se simuló empleándose Fluidodinámica Computacional (CFD). Los resultados numéricos muestran la influencia de la fluidodinámica en el desempeño térmico de este tipo de intercambiador.

Resultados como las temperaturas de salida del fluido caliente y frío, caída de presión y coeficiente de transferencia de calor para el intercambiador de calor simulado se compararon con valores publicados por Alfa Laval para las mismas condiciones simuladas.

Introducción

Los intercambiadores de calor son equipos usados para promover la transferencia de calor entre fluidos. Los modelos más comunes son los de tubos y carcasa, tubulares y los de placas. Estos últimos, además de ser muy eficientes y de fácil mantenimiento y limpieza (Fernandes *et al.*, 2005), son muy flexibles debido a su proyecto modular (Reppich, 1999). Otra ventaja de los intercambiadores de calor de placas es el pequeño espacio que requieren para su instalación y mantenimiento (Gut y Pinto, 2003). Llegan a ser cuatro veces menores que los intercambiadores de calor de carcasa y tubo proyectados para la misma capacidad térmica. En la literatura se pueden encontrar trabajos sobre la distribución de flujo en el intercambiador de placas (Srihari *et al.*, 2005) optimización de la geometría (Gut y Pinto, 2004; Foli *et al.*, 2006), modelación (Gut y Pinto, 2003) y simulación numérica con CFD (Fernandes *et al.*, 2005).

Los intercambiadores de calor de placas tradicionales, con sellado por juntas, tienen un uso estricto, por ejemplo, en la industria del petróleo en función a que están limitados a operaciones con temperaturas menores a 180°C. Con la introducción en el mercado de los intercambiadores de calor compactos, que usan Placas Totalmente Soldadas (TCPS), es posible obtener los beneficios de alta eficiencia en la transferencia de calor de los intercambiadores de placas con las ventajas estructurales y mecánicas de otros intercambiadores de calor. Una vez que no haya junta entre las placas, el intercambiador puede operar con temperaturas de hasta 350°C y presiones de hasta 35 bar, con alta eficiencia de transferencia de calor cuando se compara con un intercambiador de calor de tubos y carcasa. Otra propiedad importante es que en él se generan altos esfuerzos cortantes debido al arreglo de las placas corrugadas. Estas características hacen que el TCPS se recomiende para servicios con fluidos corrosivos, que presentan un alto grado de suciedad y alta viscosidad, lo que justifica el crecimiento del uso de esos intercambiadores en la industria del petróleo en general. La CFD es una herramienta que a través de la resolución de ecuaciones de conservación, permite prever el comportamiento termo-fluidodinámico de dicho proceso. En este trabajo, se expone la realización en la cual un TCPS modelo Compabloc CP 15 de Alfa Laval, que contiene 23 placas, con servicio realizado en un paso, se simuló con el auxilio de CFD. Los fluidos pasan por el intercambiador en flujo cruzado, ya que cada placa tiene uno de los lados en contacto con el fluido frío y el otro en contacto con el fluido caliente. La figura 1 muestra una visualización de un Compabloc con cuatro pasos.

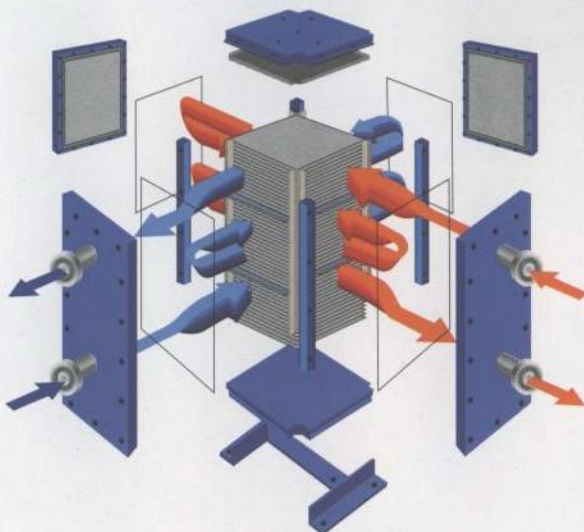


Figura 1. Visión esquemática del Compabloc, de Alfa Laval.

El objetivo de simulación es analizar la fluidodinámica del intercambiador, prever la temperatura de la corriente de salida de los fluidos y hacer una comparación entre los resultados de simulación con los datos otorgados por Alfa Laval, obtenidos en las mismas condiciones simuladas.

Materiales y métodos

Una simulación en CFD consiste básicamente en cinco etapas. La primera comprende la definición del dominio que será simulado y diseño de geometría, en el software apropiado. En la segunda etapa el dominio se debe subdividir en pequeñas porciones formando la llamada malla computacional, donde se resolverán las ecuaciones de conservación, como se presentó en la ecuación 1 de acuerdo con Maliska (2003), donde u , v y w representan los componentes de velocidad en las direcciones x , y y z respectivamente, D representa un coeficiente de transferencia, siendo transferencia de momento de energía o masa, ρ es la densidad del fluido, ϕ es una variable de flujo y S^ϕ es un término fuente. La tabla 1 muestra los valores de esas variables de ecuación de conservación para el caso de conservación de momento, de energía y de masa, donde μ es la viscosidad del fluido, C_p es el calor específico del fluido a presión constante, k es la conductividad térmica. D representa la difusividad, C representa la concentración del componente, T es la temperatura y B_x , B_y y B_z son las fuerzas de campo del flujo.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) + S^\phi \quad (1)$$

La tercera etapa es la modelación, donde se definen las condiciones de contorno necesarias a la realización de la cuarta etapa que es la solución numérica del problema. La quinta etapa consiste en el análisis y tratamiento de los resultados.

La simulación en CFD se realizó con el paquete comercial CFX-10.0 de Ansys usando los programas Design

Modeler (geometría), ICEM (malla), CFX-Pre (modelo), CFX-Solver (solución numérica) y CFX-Post (tratamiento de los resultados). Para tal, se usó un computador Pentium IV/3GHz, con 2Gb de memoria RAM.

Tabla 1. Variables de ecuación de conservación.

Ecuación de conservación	φ	Γ_{φ}	S_{φ}
Masa	1	0	0
Masa de dado componente	C	ρD	0
Momento en x	u	μ	$B_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial P}{\partial x}$
Momento en y	v	μ	$B_y + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y}$
Momento en z	w	μ	$B_z + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial z}$
Energía	T	$\frac{k}{C_p}$	$\frac{1}{C_p} \frac{DP}{Dt} + \frac{\mu}{C_p} \Phi$

Dominio y geometría

El Compabloc funciona con flujo cruzado, en el cual los fluidos caliente y frío fluyen entre los canales formados por las placas. Una visión esquemática de la disposición del Compabloc se presenta en la figura 2. El modelo simulado en CFD es el CP 15 que se compone de placas cuadradas de 15 cm de ancho y 0,8 mm de espesor.

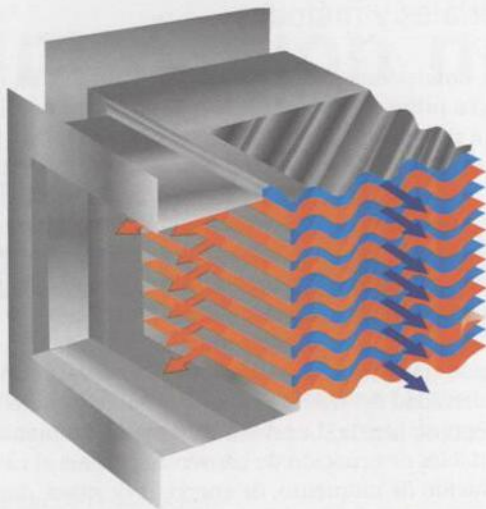


Figura 2. Representación de los canales del Compabloc.

El dominio simulado en este trabajo es la región entre las placas por donde pasan los fluidos caliente y frío. Por ser éste un dominio de difícil visualización, ya que es una región interna, la estrategia usada para representar este dominio fue diseñar tres placas sucesivas, considerando el espaciamiento real. Con la ayuda del software se retiró el relleno entre ellas, formando el dominio caliente y frío que en conjunto con la placa central forman el dominio completo analizado en la simulación. La figura 3 presenta una vista frontal de la placa del Compabloc, donde es posible observar la geometría de las ondulaciones de la placa. La figura 4 presenta una vista lateral del dominio que se simuló. La región superior del dominio es la región por donde



Figura 3. Vista superior de la placa de Compabloc.

pasará el fluido frío. La región central más oscura representa la placa por donde pasará calor debido al fenómeno de conducción térmica.



Figura 4. Vista lateral del dominio simulado.

Malla

El dominio se dividió en 303.831 elementos hexaédricos, en un total de 340.000 nudos, formando una malla estructurada. La figura 5 muestra una visualización de la malla.

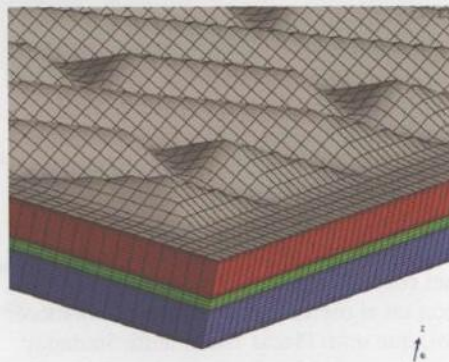


Figura 5. Malla utilizada en la simulación.

Fluidos y condiciones de contorno

Las simulaciones realizadas tuvieron como objetivo analizar la fluidodinámica del intercambiador y comparar los resultados simulados con los datos otorgados por Alfa Laval, a través del programa CAS200. Los fluidos usados en la simulación fueron Residuo de Vacío (RV), como fluido caliente, y petróleo (CRU), como fluido frío. Las propiedades de los fluidos que se usaron en CFX/Pre se presentan en la tabla 2 y se consideraron constantes durante la simulación por presentar pequeñas variaciones para la franja de temperaturas simuladas.

Tabla 2. Propiedades de los fluidos simulados.

	RV	CRU
Densidad (kg./m³)	908,6	828,85
Capacidad Calorífica (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	2362	2262
Conductividad Térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,1595	0,1285
Viscosidad (cp)	63,8	31,6

La simulación se realizó en estado estacionario y las condiciones de contorno definidas para el problema fueron las temperaturas de entrada y el flujo másico de los fluidos

caliente y frío. El modelo de turbulencia usado fue k-E que, de acuerdo con Freire *et al.* (2002) y ANSYS (2005), es un modelo de dos ecuaciones muy usado en cálculos de ingeniería por ser numéricamente robusto. Las paredes laterales, superior e inferior del intercambiador se definieron como adiabáticas para evitar la pérdida de calor para el medio externo al dominio. La tabla 3 presenta los valores definidos como condiciones de contorno y el criterio de convergencia empleado.

Tabla 3. Condiciones de contorno de simulación.

	RV	CRU
Temperatura de entrada (°C)	180	120
Flujo másico (kg/s) para 12 canales	0,5	0,75
Laterales del dominio	adiabática	adiabática
Pared superior	adiabática	adiabática
Pared inferior	adiabática	adiabática
Criterio de convergencia	1×10^{-5}	1×10^{-5}

Resultados

Fluidodinámica

La figura 6 muestra las líneas de corriente para el flujo del fluido frío, dentro del intercambiador, coloreadas de acuerdo con la variable velocidad. El color rojo representa las mayores velocidades, mientras que el azul las menores. La región izquierda del gráfico representa la entrada del fluido, la región a la derecha representa la salida y las regiones superior e inferior del gráfico representan las laterales del Compabloc. Un análisis de la figura 6 muestra que el flujo en Compabloc sigue un trayecto ondulado causado por la geometría de la placa y cuando observamos el detalle de apenas una línea de corriente, como lo que se muestra en la figura 7, es posible verificar que el flujo en verdad tiene forma de espiral.

La figura 6 también muestra la existencia de un camino preferencial del fluido en las regiones laterales del intercambiador (*bypass lateral*). En esas regiones, a pesar de que la velocidad es aproximadamente dos veces mayor que en el centro del intercambiador, lo que mejoraría la transferencia térmica por el aumento del número de Reynolds (*Re*) y el consecuente aumento del Nusselt (*Un*),

se observa en la figura 8 una menor transferencia térmica en esa región, cuando se la compara con el cuerpo del intercambiador. Es posible que esto sea debido al hecho de que en la región central corrugada la geometría de la placa proporciona un flujo con mayores niveles de turbulencia. Considerando la velocidad de paso de fluido se puede calcular que, para el caso en estudio, el flujo que pasa por esas regiones de baja transferencia térmica representa el 2,5% del caudal total del intercambiador.

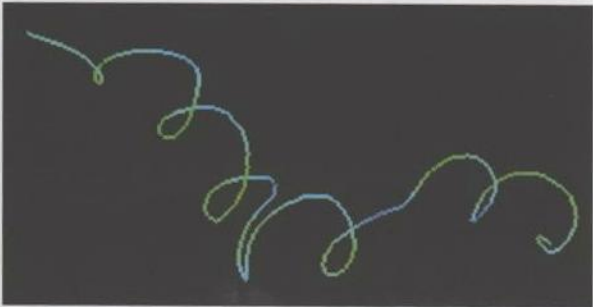


Figura 7. Detalle de una línea de corriente.

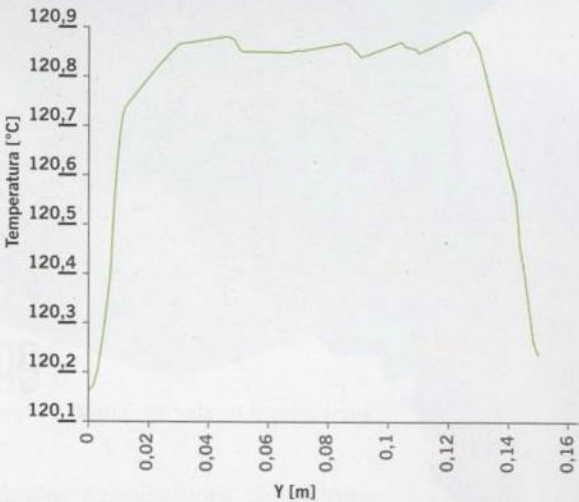


Figura 8. Perfil de temperaturas en función de la distancia transversal del flujo.

Con la simulación es posible obtener propiedades importantes del intercambiador de calor como coeficiente de transferencia de calor local, presentado en la figura 9 y el perfil de flujo de calor a través de la placa, presentado en la figura 10.

Comparación de simulación en CFD con los datos del CAS200 de Alfa Laval

La tabla 4 muestra los resultados de las temperaturas de

Tabla 4. Comparación entre los resultados de simulacro con CFD y de la previsión con el CAS200.

	Simulacro	CAS200
Temperatura de salida de fluido caliente (°C)	177,9	173,9
Temperatura de salida de fluido frío (°C)	121,2	124,3
Caída de presión del lado caliente (kPa)	0,664	0,718
Caída de presión de lado frío	0,1824	0,192

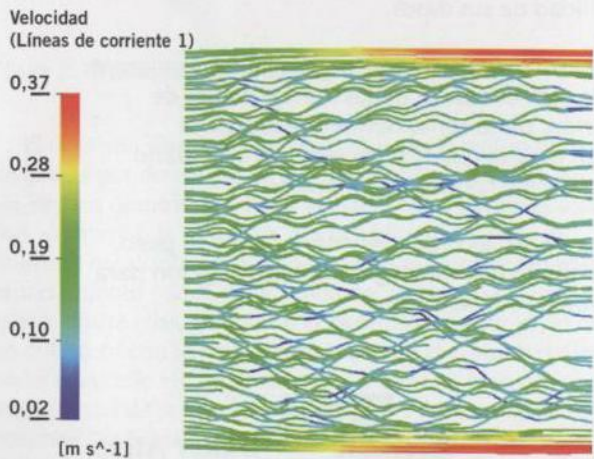


Figura 6. Líneas de corriente de flujo del fluido frío.

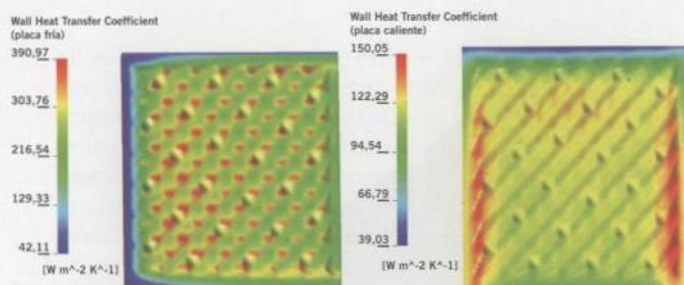


Figura 9. Coeficiente de transferencia de calor del fluido frío (a la derecha) y del fluido caliente a la izquierda.

salida y de las caídas de presión, para los fluidos caliente y frío. Basado en los datos de esta tabla, es posible observar que la temperatura de salida del fluido frío se presenta menor que la temperatura de salida del CAS200, mientras que la temperatura de salida del fluido caliente se presenta mayor que la del CAS200, indicando que el flujo de calor a través de la placa calculado en la simulación en CDF fue menor que el flujo de calor calculado con el programa propietario de Alfa Laval. Esta diferencia puede relacionarse con el modelo de turbulencia empleado (k-E), que usa funciones de pared para modelar el flujo cercano a la pared, región crucial para la transferencia térmica en intercambiadores de calor de placas. En relación con las presiones, los resultados entre la simulación numérica y los previstos por

el CAS200 fueron muy cercanos indicando que esta variable fue bien representada por la simulación.

Conclusión

Los resultados simulados muestran que las placas corrugadas del Compabloc causan un efecto positivo en el desempeño del intercambiador, debido al movimiento en espiral que le imponen al fluido. Un punto negativo para el desempeño del intercambiador es el *paso preferencial* del fluido en las regiones laterales del mismo. Este *bypass* representó, para el caso simulado, el 2,5% del flujo total y es un punto a ser observado en una posible optimización de la geometría del Compabloc.

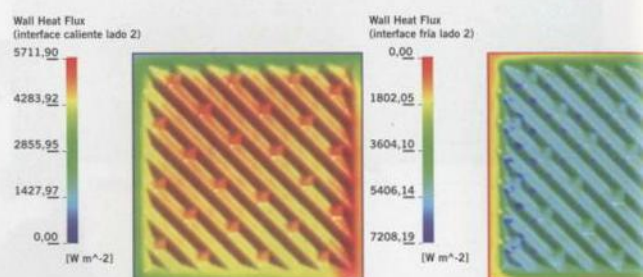


Figura 10. Flujo de calor a través de la placa por el lado frío (a la izquierda) y por el lado caliente a la derecha.



Unidad Correctora de Volumen
PROSER CFI-117

Computadores de Caudal
Unidades Correctoras de Volumen
Analizador En Línea de Gas Natural
Dispositivos de Conectividad Industrial



www.proser.com.ar
ventas@proser.com.ar

PROSER
Soluciones para la Industria

De manera general, la simulación presentó buenos resultados y mostró que con el CFD es posible obtener el valor de variables como el coeficiente de transferencia de calor a través de la resolución de las ecuaciones de conservación, sin la necesidad de utilizar ecuaciones con parámetros ajustados que tienen errores implícitos en sus previsiones.

Un camino para adecuar mejor los resultados de la transferencia de calor obtenidos con la simulación numérica al problema físico es probar otros modelos de turbulencia que resuelvan mejor la región cercana a la pared, como el reciente modelo propuesto por Alfradique y Telles (2006). Este estudio será testeado en una próxima etapa del trabajo. ■

Foli, K., Okabe, T., Olhofer, M., Jin, Y., Sendhoff, B., "Optimization of micro heat exchanger: CFD, analytical approach and multi-objective evolutionary algorithms", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 49, p. 1090-1099, 2006.

Freire, A.; Menut, P.; Jian, S. *Turbulência*, ABCM, Rio de Janeiro, 2002.

Maliska, C., *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*, 2ª ed., LTC, 2003.

Bibliografía

Alfradique, M. F., Telles, A. S., "Closure of turbulent fluxes for the transport of momentum, energy, and mass", *AIChE Journal*, 2006 (no prelo).

ANSYS, *Manual do CFX*, 2005.

Fernandes, C. S. F., Dias, R., Nóbrega, J. M., Afonso, I. M., Melo, L. F., Maia, J. M., "Simulation of stirred yoghurt processing in plate heat exchangers", *Journal of Food Engineering*, v. 69, p. 281-290, 2005.

Para mayor información contactar a:

Ing. Mauricio Badino-Energy Process Technology Alfa Laval Argentina. Tel. +54 11 4725-7340 /mauricio.badino@alfalaval.com

Lic. Soledad Torres - Relaciones Públicas e Institucionales Alfa Laval S.A. Tel. +54 11 4725-7322 / soledad.torres@alfalaval.com
www.alfalaval.com

WENLEN S.A.

PRODUCTOS ARGENTINOS PARA GAS, PETRÓLEO,
PETROQUÍMICA E INDUSTRIA EN GENERAL

INDUSTRIA ARGENTINA

VÁLVULAS ESFÉRICAS BRIDADAS

- Amplio rango de medidas
(de 1/2" a 36")
- Productos acordes a su medida:
• Acero forjado o fundido
- Solución Integrada
(Panel | válvula | Actuador)
- Amplio rango de presión

CABEZALES Y ARMADURAS DE SURGENCIA

- Diversidad de diseños
• Amplio rango de medidas y presiones
- Soluciones Integrales para clientes
• Integridad total para bocas de pozos
• Servicios de campo
• Integración de grupos de capacitación
• Mejoras continuas de T.C.O
• Servicios de Pre-venta y Post-venta



PLANTA INDUSTRIAL, ADMINISTRACION Y VENTAS:

ESTRADA 180 - (B1661ARD) BELLA VISTA - BS AS - ARGENTINA
TELÉFONOS: (54-11) 4666-0969 | 4668-2032
FAX: (54-11) 4666-0791 | VENTAS TEL/FAX: 4666-5864
www.wenlen.com | e-mail: ventas@wenlen.com

BASE DE SERVICIOS EN NEUQUEN:

JUAN BENIGAR 485 (8300) NEUQUÉN
TEL/FAX: (0299) 44 0235 | E-MAIL: bnqn@wenlen.com

BASE DE SERVICIOS EN COM. RIVADAVIA:

AV. QUINTANA 136, KM. 3 (9005) COM. RIVADAVIA
TEL/FAX: (0297) 455 1256 | E-MAIL: bcrd@wenlen.com