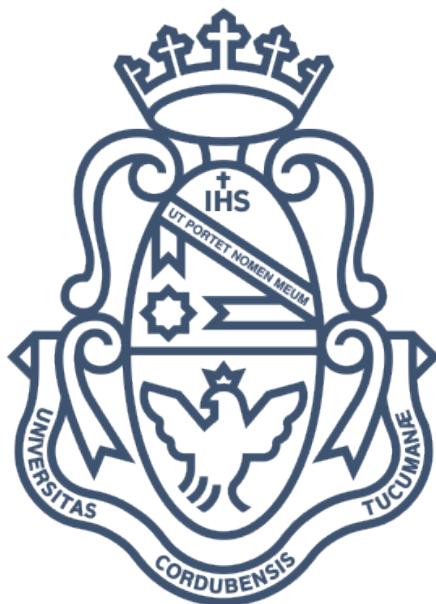


Diseño de una balanza para uso comercial.

Síntesis de Redes Activas

2025



Integrantes

BAZOALTO ROCABADO	Jacqueline	43169389
CABERO	Mauro Ezequiel	43761887
MORA	Ivan Alexander	38776379
MORAN	Mauro Hugo	42583125
RUIZ	Iván Marcelo	41402048

Docentes

Ing. Ferreyra, Pablo
Ing. Reale, César

Índice

1. Introducción y Marco Teórico	1
1.1. Objetivo del Diseño	1
1.2. Criterio de Diseño Aplicado	1
1.3. Fundamentos de Celdas de Carga y Puentes de Wheatstone	1
2. Propuesta de Diseño y Desarrollo Analítico	2
2.1. Selección del Sensor: Celda de Carga (Modelo TAL220B)	2
2.2. Selección del ADC y Acondicionamiento: HX711	2
2.3. Sistema de Procesamiento: ATmega88PB	3
2.3.1. Gestión de la Lectura y Calibración	3
2.3.2. Instrucción de Software N°1: Filtrado Digital	3
3. Análisis de Errores y Límites de Operación	3
3.1. Presupuesto de Error de la Etapa Analógica	3
3.2. Error de Cuantificación y Resolución Efectiva	4
3.3. Error Total del Sistema y Comparación con los Requerimientos	4
3.4. Límites de Operación por Temperatura (0°C a 40°C)	4
4. Estudio Económico y de Competitividad	5
4.1. Costo de Fabricación del Prototipo (Bill of Materials - BoM)	5
4.2. Análisis de Costos y Opcionales	5
4.3. Análisis de Competitividad y Escalamiento	6
5. Simulación y Validación del Diseño	6
5.1. Esquema de Conexión y Lógica de Funcionamiento	6
6. Marco Normativo y Regulación en Argentina	7
6.1. Ensayos y Certificación del INTI	7
6.2. Análisis de Barreras de Entrada y Costos de Homologación	8
7. Conclusión	9

1. Introducción y Marco Teórico

1.1. Objetivo del Diseño

El objetivo de este proyecto es el diseño analítico de una balanza comercial con una capacidad de 2 kg y una resolución de 1 g. El diseño se rige por un criterio de máxima optimización *costo–precisión*. La arquitectura se basa en la utilización del circuito integrado especializado HX711, el cual incorpora un amplificador de ganancia programable (PGA) y un conversor A/D de 24 bits, gestionado por un microcontrolador de bajo costo.

La precisión requerida se garantiza mediante la alta resolución del conversor dedicado, delegando al *software* la tarea de filtrado digital y compensación de errores sistemáticos (tara y calibración lineal).

1.2. Criterio de Diseño Aplicado

El criterio fundamental que rige este diseño es la optimización del costo mediante el uso de componentes de alta integración específica (ASIC) en lugar de cadenas analógicas discretas complejas. Se adoptan los siguientes principios:

- **Minimización del costo de hardware:** Se evita el uso de múltiples etapas de amplificadores operacionales discretos que requieren resistencias de precisión costosas. En su lugar, se emplea el módulo HX711 que integra la etapa de acondicionamiento completa, reduciendo drásticamente el costo del BOM y el tamaño del PCB.
- **Integridad de Señal:** La fiabilidad de la medición se logra digitalizando la señal lo más cerca posible del sensor. Al utilizar un conversor $\Sigma - \Delta$ de 24 bits, se minimiza la susceptibilidad al ruido electromagnético que afectaría a una señal analógica amplificada transportada por la placa.
- **Compensación por software:** Se prioriza la implementación de algoritmos eficientes en el microcontrolador ATmega88PB. Esto incluye rutinas de *media móvil* para estabilizar la lectura ante vibraciones y almacenamiento de constantes de calibración en EEPROM para corregir las tolerancias mecánicas del sensor.

1.3. Fundamentos de Celdas de Carga y Puentes de Wheatstone

El núcleo de cualquier sistema de pesaje electrónico es la celda de carga (*load cell*), un transductor que convierte la fuerza mecánica aplicada sobre su estructura en una señal eléctrica medible.

- **Galgas Extensiometrías (*Strain Gauges*):** El principio de operación se basa en galgas extensiometrías, elementos resistivos adheridos al cuerpo elástico de la celda. Al aplicar una carga, la deformación del material provoca un cambio proporcional en la resistencia eléctrica de las galgas.
- **Configuración en Puente de Wheatstone:** Para maximizar la sensibilidad y reducir el efecto del ruido, las galgas se conectan en una configuración de puente de Wheatstone completo. Esta disposición ofrece:
 1. Transformación de pequeñas variaciones de resistencia en una **tensión diferencial de salida**.

2. **Compensación térmica inherente**, ya que las galgas comparten las mismas condiciones ambientales, anulando en gran medida las variaciones por temperatura.
- **Señal de Salida:** La señal resultante es un voltaje diferencial de baja magnitud, normalmente expresado en mV/V. La celda seleccionada en este proyecto (modelo TAL220B) posee una sensibilidad nominal de $1.0 \pm 0.1 \text{ mV/V}$, requiriendo por lo tanto una etapa de amplificación de alta ganancia y bajo ruido.

2. Propuesta de Diseño y Desarrollo Analítico

2.1. Selección del Sensor: Celda de Carga (Modelo TAL220B)

Para la transducción de la magnitud física (peso) a una variable eléctrica, se ha seleccionado la celda de carga modelo **TAL220B** tipo barra (*straight bar*). A diferencia de los sensores resistivos de película delgada (como el GD-10), este modelo se basa en un bloque mecanizado de aleación de aluminio con cuatro galgas extensiometrías conectadas en puente de Wheatstone completo.

Características Técnicas Relevantes:

- **Capacidad Nominal:** 3 kg (se limitará a 2 kg por diseño).
- **Sensibilidad Nominal (S):** $1.0 \pm 0.15 \text{ mV/V}$.
- **Impedancia de Entrada/Salida:** $1000 \pm 10 \Omega$.
- **Error Combinado:** $\leq 0.05\% \text{ F.S.}$ (Fondo de Escala).

Considerando una alimentación de excitación $V_{exc} = 5 \text{ V}$ y la sensibilidad nominal de 1 mV/V , la tensión diferencial máxima a plena carga (2 kg) será:

$$V_{out(max)} = V_{exc} \times S \times \frac{2kg}{3kg} \approx 5V \times 1 \frac{\text{mV}}{\text{V}} \times 0.66 \approx 3.33\text{mV} \quad (1)$$

Esta magnitud extremadamente baja justifica la necesidad de una etapa de amplificación de alta precisión.

2.2. Selección del ADC y Acondicionamiento: HX711

Para la etapa de acondicionamiento y conversión analógico-digital se ha seleccionado el circuito integrado específico de aplicación (ASIC) **HX711**. Esta elección se fundamenta en la necesidad de procesar la señal extremadamente baja de la celda de carga con alta inmunidad al ruido.

Características Críticas para el Diseño:

1. **Amplificador de Ganancia Programable (PGA):** El HX711 integra un preamplificador de bajo ruido con una ganancia seleccionable de 128. Esto permite elevar la señal diferencial de la celda (nivel de mV) a un rango dinámico aprovechable por el conversor sin necesidad de amplificadores operacionales externos, eliminando fuentes de error por deriva térmica de componentes discretos.
2. **Conversión $\Sigma - \Delta$ de 24 bits:** La arquitectura Sigma-Delta proporciona una resolución teórica de 24 bits (2^{24} cuentas). Incluso considerando los bits efectivos libres de ruido (ENO) que suelen rondar los 18-20 bits en implementaciones

reales, la resolución es superior en órdenes de magnitud a los 10 bits de un microcontrolador estándar. Esto permite detectar variaciones de peso menores a 0.1 g, garantizando sobradamente el objetivo de 1 g.

3. **Interfaz Digital Simplificada:** La comunicación con el microcontrolador se realiza mediante un protocolo serie propietario de dos hilos (Clock y Data), entregando el valor ya digitalizado y filtrado, lo que reduce la carga computacional del procesador principal.

2.3. Sistema de Procesamiento: ATmega88PB

El microcontrolador ATmega88PB actúa como la unidad central de procesamiento, encargada de la interfaz con el usuario (LCD y botones) y la lectura del HX711.

2.3.1. Gestión de la Lectura y Calibración

Dado que la conversión A/D es delegada al HX711, el rol del ATmega88PB se centra en la conversión del dato crudo (“raw data”) a unidades de ingeniería (gramos). Se implementa la ecuación de transferencia:

$$Peso = \frac{Lectura_{actual} - Valortara}{Factor_{calibracion}} \quad (2)$$

Donde el $Factor_{calibracion}$ es una constante obtenida empíricamente mediante pesas patrón, almacenada en la memoria EEPROM no volátil para persistir tras el apagado.

2.3.2. Instrucción de Software N°1: Filtrado Digital

A pesar de la alta resolución del HX711, las lecturas pueden presentar fluctuaciones debido a vibraciones mecánicas en el plato o ruido eléctrico remanente.

Para estabilizar la visualización, se implementa un filtro de **Media Móvil (Moving Average)** en el firmware. Se mantiene un buffer circular de las últimas N muestras (típicamente $N = 8$ o $N = 16$):

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[n-k] \quad (3)$$

Este algoritmo actúa como un filtro pasa-bajos digital, suavizando la respuesta ante perturbaciones transitorias sin sacrificar la precisión estática final.

3. Análisis de Errores y Límites de Operación

3.1. Presupuesto de Error de la Etapa Analógica

Al sustituir la cadena discreta por el integrado HX711, el análisis de error se simplifica, desplazando la fuente principal de incertidumbre desde la electrónica hacia el elemento sensor.

1. Error del Sensor (TAL220B): El fabricante especifica un “error Combinado” (no linealidad + histéresis) de $\leq 0.05\%$ del Fondo de Escala (F.S.). Para una capacidad de 3 kg (capacidad nativa de la celda):

$$E_{sensor} = 3000g \times 0.0005 = \pm 1.5g \quad (4)$$

Al limitar el uso a 2 kg y realizar una calibración por software en este rango, la linealidad mejora, estimándose un error efectivo en el rango de trabajo de $\approx \pm 1.0\text{g}$.

2. Ruido de Entrada del HX711: El datasheet del HX711 especifica un ruido referido a la entrada de 50 nV (rms). Dado que la celda entrega 1 mV/V, con 5 V de excitación, la señal total es 5 mV. La relación Señal-Ruido (SNR) es extremadamente alta, por lo que el error introducido por el propio integrador es despreciable frente al error mecánico del sensor.

3.2. Error de Cuantificación y Resolución Efectiva

A diferencia del diseño con microcontrolador de 10 bits (que requería sobremuestreo), el HX711 ofrece 24 bits.

Resolución Teórica:

$$Res_{24bit} = \frac{Capacidad}{2^{24} - 1} \approx \frac{2000\text{g}}{16,777,215} \approx 0.0001\text{g} \quad (5)$$

Resolución Libre de Ruido (Effective Resolution): En la práctica, los últimos bits contienen ruido térmico. El HX711 garantiza establemente unos 18 bits efectivos (ENOB).

$$Res_{efectiva} = \frac{2000\text{g}}{2^{18}} \approx 0.007\text{g} \quad (6)$$

Conclusión: El error de cuantificación es inferior a 0.01 g. Esto confirma que el “quello de botella” de la precisión ya no es la conversión digital, sino la mecánica de la celda de carga. El sobremuestreo aquí se utiliza únicamente como filtro digital (promediado) para estabilizar la lectura, no para ganar resolución.

3.3. Error Total del Sistema y Comparación con los Requerimientos

Sumando las fuentes de error (RMS):

$$E_{total} = \sqrt{(E_{sensor})^2 + (E_{ADC})^2 + (E_{cuantificacion})^2} \quad (7)$$

Como $E_{sensor} (\approx 1\text{g})$ es órdenes de magnitud mayor que los errores electrónicos, el error total tiende a E_{sensor} .

Veredicto: El diseño cumple con la resolución de visualización de 1 g. Sin embargo, para garantizar que el último dígito sea estable y preciso, se requiere una rutina de calibración rigurosa que compense el offset inicial y la ganancia lineal del sensor.

3.4. Límites de Operación por Temperatura (0°C a 40°C)

El principal factor limitante es la deriva térmica del sensor (aluminio).

- **Deriva de Cero (Zero Drift):** El sensor puede variar su punto cero con la temperatura. El software debe incluir una función de .^Auto-Tara.^ al encender.
- **Deriva de Sensibilidad:** El módulo de Young del aluminio cambia con la temperatura. El HX711 tiene un drift de ganancia muy bajo (6 ppm/°C), por lo que el sistema es apto para operar entre 0 °C y 40 °C siempre que no existan gradientes térmicos bruscos.

4. Estudio Económico y de Competitividad

4.1. Costo de Fabricación del Prototipo (Bill of Materials - BoM)

A continuación se detalla el presupuesto para la fabricación de una unidad funcional.

Para la electrónica crítica se han utilizado precios internacionales de referencia (DigiKey) correspondientes a los componentes seleccionados en el diseño (HX711, ATmega88PB). Para los componentes mecánicos y periféricos, se han utilizado costos de proveedores locales y manufactura propia.

Categoría	Componente / Descripción	Cant.	Unit. (USD)	Total (USD)
Electrónica Principal (Ref. DigiKey)				
Sensores	Celda de Carga (Equiv. TAL220B) Ref. SparkFun 13329	1	14.06	14.06
ADC	Módulo Amplificador HX711 Ref. SparkFun 13879 (Placa de desarrollo)	1	10.75	10.75
MCU	Microcontrolador ATmega88PB-AU 8-bit AVR, TQFP-32	1	1.43	1.43
Display	LCD 16x2 Newhaven Display Mod. NHD-02161Z-FSY-YBW-C	1	6.76	6.76
Mecánica y Periféricos (Proveedores Locales)				
Mecánica	Carcasa (Diseño Propio) Manufactura/Impresión 3D	1	14.35	14.35
Mecánica	Plato de Acero Inoxidable Corte y plegado	1	8.97	8.97
Interfaz	Teclado Numérico Matricial Tipo Membrana o Mecánico	1	5.00	5.00
Energía	Fuente de Alimentación Adaptador AC/DC (Est. \$20.000 ARS)	1	17.90	17.90
Varios	Indicadores LED y Pasivos LEDs estado, Resistencias, PCB	Global	1.50	1.50
COSTO TOTAL ESTIMADO (PROTOTIPO)				80.72

Cuadro 1: Presupuesto consolidado del prototipo.

4.2. Análisis de Costos y Opcionales

El costo base del prototipo es de **80.72 USD**. A este valor se pueden añadir opcionales para portabilidad, según los requerimientos del cliente final:

- **Kit de Portabilidad (Baterías + Cargador + Step Down):** Según cotización local, este kit añade aproximadamente **55 USD** adicionales (Baterías 18650, Módulo de carga y regulación).
- **Total con Portabilidad:** ≈ 135.72 USD.

4.3. Análisis de Competitividad y Escalamiento

El costo actual (80 USD) corresponde a una unidad única utilizando módulos de desarrollo (como la placa roja del HX711) y manufactura de carcasa unitaria.

Comparativa de Mercado: Balanzas comerciales similares (ej. marcas Kretz o Systel) rondan los **100 - 150 USD** precio final. Nuestro prototipo tiene un costo de materiales cercano al precio de venta de la competencia, lo cual es esperado en esta etapa.

Optimización para Producción (Reducción del 60 %): Para competir comercialmente, se deben aplicar los siguientes cambios en una producción de lote:

1. **Eliminación de Módulos** ($10.75 \rightarrow 1.00USD$): Integrar el chip HX711 directamente en el PCB principal en lugar de comprar el módulo de SparkFun.
2. **Inyección de Plástico** ($14.35 \rightarrow 3.00USD$): Reemplazar la manufactura unitaria de la carcasa por inyección en moldes.
3. **Fuente de Alimentación** ($17.90 \rightarrow 5.00USD$): La fuente cotizada de 3A está sobredimensionada. Una fuente comutada de 9V 1A genérica es suficiente y mucho más económica.

Con estas optimizaciones, se estima un costo de materiales (BoM) de producción inferior a **35 USD**, permitiendo un margen comercial saludable.

5. Simulación y Validación del Diseño

5.1. Esquema de Conexión y Lógica de Funcionamiento

Para validar la interconexión de los componentes seleccionados y la lógica del firmware antes de la implementación física, se ha realizado una simulación del circuito completo. El esquema incluye el microcontrolador ATmega88PB, el módulo ADC HX711 (representado por su interfaz serial) y el display LCD 16x2.

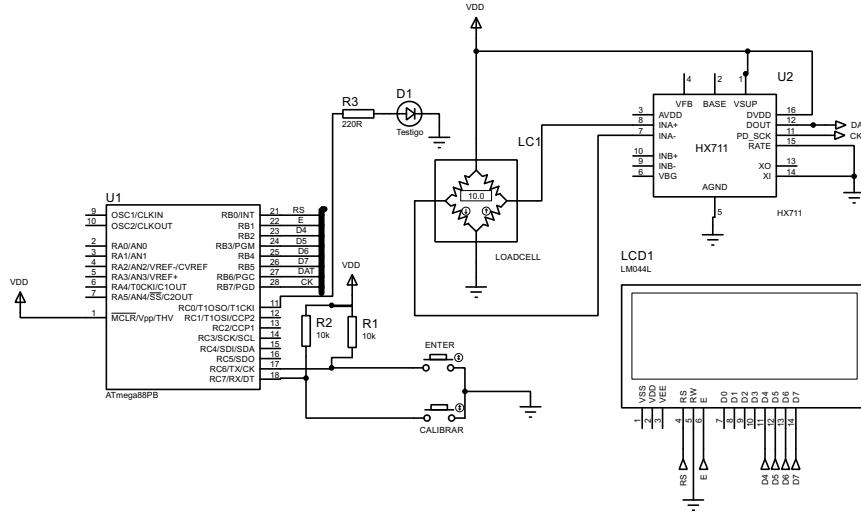


Figura 1: Esquema de simulación y conexionado del sistema (Fuente: Archivo de diseño propio).

Descripción del Conexiónado:

- Interfaz de Sensor (HX711):** El puente de Wheatstone (Celda de Carga) se conecta a las entradas analógicas diferenciales del HX711. Este se comunica con el ATmega88PB mediante un protocolo serial de dos hilos: *PD_SCK* (Reloj) y *DOUT* (Datos), conectados a los puertos digitales del microcontrolador.
- Interfaz de Usuario (LCD):** Se utiliza una configuración de 4 bits para el bus de datos del LCD con el fin de ahorrar pines en el microcontrolador, permitiendo la visualización del peso y mensajes de estado.
- Lógica de Control:** La simulación verifica que, ante variaciones en la resistencia del sensor (simulando peso), el microcontrolador procesa la trama digital del HX711 y actualiza la pantalla en tiempo real.

6. Marco Normativo y Regulación en Argentina

Para la comercialización legal de una balanza de uso público en la República Argentina, el producto debe cumplir estrictamente con las directrices de **Metroología Legal** supervisadas por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).

6.1. Ensayos y Certificación del INTI

El reglamento técnico establece que todo instrumento de pesaje de funcionamiento no automático debe someterse a cuatro instancias de control obligatorias:

1. **Solicitud de Aprobación de Modelo:** Evaluación exhaustiva del prototipo (hardware y software) para garantizar que cumple con la normativa vigente y es inalterable.
2. **Solicitud de Verificación Primitiva:** Verificación de cada unidad producida antes de su primera venta.
3. **Solicitud de Verificación Periódica:** Control recurrente (anual) para asegurar que la balanza mantiene la precisión en el tiempo.
4. **Auditoría de Declaración de Conformidad:** Inspección de los procesos de fabricación.

6.2. Análisis de Barreras de Entrada y Costos de Homologación

La homologación representa una barrera de entrada económica significativa para nuevos fabricantes. Debido a la falta de actualización oficial de precios en la web del INTI, se han realizado proyecciones financieras basadas en los aranceles de 2019 ajustados por inflación (Cálculo a valor presente).

Tipo de Trámite	Descripción	Costo Est. (ARS)
Aprobación de Modelo	Pago único inicial para certificar el diseño y habilitar la producción en masa.	\$ 3.783.635
Verificación Periódica	Costo por unidad (anual) para balanzas comerciales de hasta 31 kg.	\$ 83.264

Cuadro 2: Estimación de costos regulatorios proyectados al valor actual (Base: Tarifario INTI 2019).

Impacto en el Proyecto: El costo de *Aprobación de Modelo* (cercano a los 3.8 millones de pesos) resulta prohibitivo para una producción de baja escala o prototipado académico.

Supuesto para el Análisis Económico: Para efectos de la viabilidad financiera calculada en la sección anterior, se asume que el modelo ya cuenta con la aprobación de diseño ("Modelo Homologado"), imputándose al costo unitario únicamente los gastos de materiales y manufactura. Esta restricción evidencia la necesidad crítica de reducir los costos de hardware al mínimo posible para compensar la alta carga impositiva y regulatoria del sector.

7. Conclusión

El desarrollo del presente trabajo ha permitido validar la viabilidad técnica y económica de fabricar una balanza comercial de 2 kg con resolución de 1 g utilizando componentes accesibles.

La decisión clave de diseño de incorporar el HX711 en lugar de una cadena de amplificación discreta ha resultado determinante. Esta elección no solo ha simplificado el diseño del PCB y reducido el costo del BoM, sino que ha eliminado problemas complejos de la electrónica analógica (como el offset y el ruido térmico de las resistencias), trasladando el desafío de la precisión casi exclusivamente a la calidad mecánica del sensor (Celda TAL220B) y al procesamiento de software.

Se concluye que, si bien el hardware (Sensor + ADC) es capaz de detectar variaciones inferiores a 0.1 g, la precisión final de 1 g depende intrínsecamente de la implementación correcta de algoritmos de filtrado digital (media móvil) y rutinas de calibración lineal en el microcontrolador.

Asimismo, el análisis del marco regulatorio argentino evidencia que las barreras de entrada burocráticas (costos de homologación ante el INTI) representan un desafío financiero superior al desarrollo tecnológico en sí mismo. Esto valida aún más la estrategia de diseño de "bajo costo," adoptada, ya que minimizar el costo del hardware es la única vía para amortizar la alta carga impositiva y regulatoria en el precio final del producto.

Finalmente, la proyección económica demuestra que, aunque el prototipo tiene un costo unitario de \approx 80 USD, la optimización para producción en masa permitiría reducir esta cifra por debajo de los 35 USD. Esto posicionaría a la balanza como un producto altamente competitivo frente a alternativas comerciales actuales, cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos de optimización costo-beneficio planteados en la introducción.

Referencias

- [1] Microchip Technology, *ATMEGA88PB-AU: 8-bit AVR Microcontroller Datasheet*. Disponible en DigiKey Electronics.
Enlace: <https://www.digikey.com/en/products/detail/microchip-technology/ATMEGA88PB-AU/5029507>
- [2] SparkFun Electronics, *Load Cell Amplifier HX711 (SEN-13879)*. Disponible en DigiKey Electronics.
Enlace: <https://www.digikey.es/es/products/detail/sparkfun-electronics/13879/6202732>
- [3] SparkFun Electronics, *Load Cell - 10kg, Straight Bar (TAL220 Equivalent)*. Disponible en DigiKey Electronics.
Enlace: <https://www.digikey.com/en/products/detail/sparkfun-electronics/13329/7393715>
- [4] Newhaven Display Intl., *NHD-02161Z-FSY-YBW-C: LCD Module 16x2 Character*. Disponible en DigiKey Electronics.
Enlace: <https://www.digikey.com/en/products/detail/newhaven-display-intl/NHD-02161Z-FSY-YBW-C/1701165>
- [5] Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), *Reglamento Técnico y Metrología Legal de Balanzas Comerciales*. Buenos Aires, Argentina.