

# Crónica de la idea, desarrollo y construcción de un vehículo eléctrico

En tiempos de cuarentena, en Portugal e inspirado en las actividades de los transeúntes en una calle de paseo, el ingeniero

Luis Buresti ideó, desarrolló y construyó de forma amateur "ecoPT", un vehículo eléctrico de cuatro ruedas para comandar en posición erguida. En este artículo, una crónica de todo el proceso, desde la idea hasta el desarrollo de la última versión.

Luis Buresti  
[luis.buresti@gmail.com](mailto:luis.buresti@gmail.com)

Proyecto ecoPT  
<https://www.youtube.com/watch?v=-Ps5cx3NhpK>

## El origen de la idea

En enero de 2020, unos pocos meses antes del inicio del "caos" CoViD, tuve la oportunidad de estar algunos días en Marbella (España). En esa ciudad, hay una calle costanera peatonal muy concurrida, inclusive en invierno. La mayoría de la gente camina por ahí varias veces ida y vuelta, otros van trotando. También hay jóvenes que usan monopatines o *segways*, y otros que circulan en patinetas o *longboards* eléctricos. Por supuesto, también es posible encontrar gente mayor que circula en triciclos eléctricos, o directamente en sillas de ruedas.

En un momento dado, tuve la oportunidad de charlar un buen rato con una persona que atendía un puesto callejero de alquiler de *segways*. Me comentó que algunas personas, digamos mayores de 50 años, no eran muy adeptas a alquilar estos vehículos porque les producía una sensación de inseguridad o, incluso, de mareo. En mi opinión, probablemente esto se debe a la función de autobalanceo que utiliza el *segway* para mantenerse en equilibrio solo con dos ruedas, aun cuando está detenido.

Es entonces que pensé que no había nada intermedio entre lo que usaban los más jóvenes y lo que usaban los que decididamente pertenecían a la tercera edad. Me imaginé que había que inventar una especie de vehículo "crossover" entre un scooter (divertido de manejar) y una silla de ruedas (inherentemente estable).

## Los puntos fundamentales de la idea original

Desde el inicio, la idea fue crear un vehículo con cuatro ruedas, pero que se conduzca estando parado. Después de todo, Neil Armstrong aterrizó el módulo lunar estando parado y casi sin ningún apoyo adicional.

Era importante adoptar soluciones modernas y,

por lo tanto, era deseable eliminar todo tipo de comando mecánico, o sea, elementos tales como un volante de dirección o cables de freno. También, consideré que una maniobrabilidad fina era fundamental, ya que este es un vehículo que seguramente será utilizado en calles o veredas compartidas con peatones. Esta característica, además, podría ayudar para convertir el vehículo en una plataforma de observación en lugares muy concurridos.

Para completar la idea, se imponía también lograr un buen manejo energético. Para esto, decidí incorporar un panel solar y adoptar la técnica de frenado regenerativo, que permite que la energía cinética del vehículo en movimiento se convierta nuevamente en energía almacenada en las baterías, lo cual contrasta fuertemente con lo que hacen los frenos mecánicos convencionales, que simplemente disipan esa energía como calor al ambiente.

*"Me imaginé que había que inventar una especie de vehículo 'crossover' entre un scooter (divertido de manejar) y una silla de ruedas (inherentemente estable)".*

### Algunas características del proyecto

La decisión fue construir un prototipo que fuera lo más simple posible, teniendo en cuenta que disponía de pocos recursos en lo que se refiere a espacio de trabajo, herramental e instrumental de medición.

El diseño lo hice con papel, lápiz y goma, algo claramente alejado de los métodos actuales de trabajo. En consecuencia, y a pesar de los cuida-



Figura 1. Procedimientos ingenuos de diseño. A falta de otros recursos, se hicieron varios esquemas sobre cartones en escala 1:1 para planificar la distribución de componentes. El primero es un mock-up/fotomontaje de la plataforma principal; el segundo corresponde al pórtico de comando. Seguramente un puesto de trabajo CATIA habría sido excesivo, pero AutoCAD 3D habría sido una buena herramienta para este proyecto.

dos que tuve, surgieron algunos problemas debidos a interferencias mecánicas. Afortunadamente, casi todos estos inconvenientes se pudieron resolver con relativa facilidad. No obstante, estas limitaciones nunca fueron una razón para restringir los objetivos pretendidos, es decir, que un manejo energético eficiente, una conducción divertida y una mecánica moderna se mantuvieron como premisas irrenunciables.

También consideré este proyecto como una buena oportunidad para probar tantos componentes de "calidad comercial" como fuera posible, de proveedores de bajo costo tales como Amazon, BangGood, AliExpress, y otros.

Un objetivo secundario era utilizar este proyecto como excusa para desarrollar proveedores en la zona. Esto es en consideración de futuros desa-



**Figura 2.** Montaje del ecoPT (primera versión). Izquierda: vista general de la construcción. El panel solar cumple un rol de alfombra en la plataforma que ocupa el conductor. Derecha: vista del espacio entre plataformas. Todos los elementos del tren de tracción, de la alimentación eléctrica y del sistema de control están montados en esta zona. Los cuatro packs de baterías se pueden ver en primer plano. Los suplementos de elevación son solo para los ensayos de rotación de las ruedas.

rollos, como el “momentáneamente archivado” eeBoat. Considerando las características del sur de Portugal, ese proyecto en particular resultó ambicioso. Fue un proceso que demandó mucho tiempo y fue el origen de una serie de anécdotas, algunas de ellas, extremadamente graciosas. No obstante, los resultados terminaron siendo muy positivos, ya que casi todos los proveedores locales seleccionados mostraron ser muy confiables, con una excelente calidad de trabajo y, lo más importante, con un trato personal muy agradable. De todas maneras, es importante mencionar que la mayor parte de las piezas mecanizadas fueron provistas desde Argentina.

Todo este proceso también fue útil para familiarizarme con las prácticas comerciales y procedimientos administrativos locales (por ejemplo, despachos de Aduana).

Me esforcé para que la documentación de diseño y construcción fuera lo más rigurosa y detallada posible. Esto no solo era deseable por una mini-

ma razón de orden, sino que además era esencial para evitar errores al trabajar con proveedores de distintos países y en distintos idiomas.

Solo a los efectos de dar una idea de los tiempos involucrados, se puede mencionar que las compras de componentes iniciaron hacia el 20 de julio; el montaje de la primera versión, hacia fines de agosto de ese mismo año, y el proyecto se dio por terminado oficialmente en abril de 2021.

Es importante destacar que el proyecto ecoPT se hizo de forma amateur, totalmente financiado por este autor, sin ningún interés económico específico.

*“La decisión fue construir un prototipo que fuera lo más simple posible, teniendo en cuenta que disponía de pocos recursos en lo que se refiere a espacio de trabajo, herramienta e instrumental de medición”.*

## El nombre

Las letras “PT” son las iniciales de “Personal Transporter” (“transportador personal”). Solo por casualidad “PT” también es la sigla de Internet de Portugal, país en donde desarrollé este proyecto.

La denominación final “ecoPT” intenta poner énfasis en los aspectos energéticos, en particular debido al hecho de que este vehículo podría ser totalmente autosuficiente.

Debido a la crisis mundial CoViD, todos los temas vinculados con la movilidad urbana han cobrado relevancia, y por lo tanto el subtítulo “Clever Personal Mobility” (movilidad personal inteligente)

podría ser el que mejor represente las ideas subyacentes de este proyecto.

Otras siglas que también incorporé a la gráfica del vehículo son las que siguen:

- » DbW: Drive by Wire (conducción por cable)
- » 4WD: Four Wheel Drive (manejo con cuatro ruedas)
- » h.Power: Hybrid Power (potencia híbrida)
- » r.Brake: Regenerative Brake (freno regenerativo)

La cruz suiza amarilla que incorporé como una suerte de logotipo en el panel frontal intenta representar el signo matemático de suma “+” para transmitir la idea de que el ecoPT es la suma de diversas tecnologías y capacidades.

Hasta ahora, el ecoPT también ha recibido varios sobrenombres. Por nombrar algunos: “Segway del Tercer Mundo”, “Rompeesaldas”, etc. De todas maneras, la denominación más representativa se la dio mi nieto Pedrito: “Viejiteitor” (tal vez habría que escribirlo “Viejitator”).

*“La denominación final ‘ecoPT’ intenta poner énfasis en los aspectos energéticos, en particular debido al hecho de que este vehículo podría ser totalmente autosuficiente”.*

## La mecánica

Resolví la estructura del ecoPT mediante dos simples plataformas construidas con madera MDF. En la plataforma inferior, ubiqué las ruedas/motores, los packs de baterías, las barras de distribución de potencia eléctrica y toda la electrónica



Video 2. Ensayos de resistencia de las plataformas  
<https://www.youtube.com/watch?v=F5J2sq7Tnw4>

de control; mientras que en la plataforma superior, monté el panel solar y, obviamente, sirve de piso para el conductor.

Debido a que, inicialmente, tuve algunas dudas sobre la resistencia mecánica de las plataformas, hice algunos ensayos para estimar la deformación que podrían presentar (ver video 2).

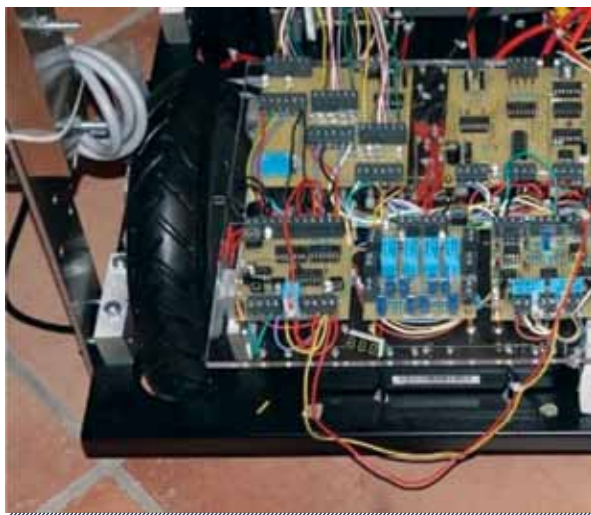
Los instrumentos, y todos los elementos de comando, se ubicaron en un pórtico construido con tubo de acero inoxidable. El diseño simple de esta pieza intentó adecuarse a los métodos de fabricación disponibles localmente.

Para la propulsión, seleccioné cuatro motores “Hub-Motors”. Estos dispositivos, que son los que se emplean habitualmente en los monopatines eléctricos, son un conjunto compacto cuyo motor eléctrico BLDC está integrado en la llanta de la rueda. Existe una gran variedad de modelos disponibles, con precios accesibles.

Debido a que las ruedas motrices son cuatro, la idea original fue implementar un sistema de dirección diferencial (en inglés, “Differential Steering”) similar al que utilizan algunos vehículos guiados automáticamente (AGV, por sus siglas en inglés). Este aspecto del diseño lo analizo con cierto detalle más adelante.

Como ya dije, adopté el método de frenado rege-





**Figura 3.** No es conveniente usar una alpargata como freno de prony. Durante uno de los ensayos iniciales, estaba calzado con alpargatas y frené repetidamente una de las ruedas con mi pie. Lo hice para analizar el consumo eléctrico del motor y la estabilización del lazo PID de velocidad. La mancha negra que se puede ver en el piso es polvo proveniente de la suela carbonizada. El trazo del medio lo hice con el dedo, simplemente porque no entendía qué había sucedido.

nerativo para este vehículo. Es importante tener en cuenta que esta técnica de frenado solo es eficiente mientras el vehículo está en movimiento. A baja velocidad, o con el vehículo parado, el frenado regenerativo tiene poco o ningún efecto.

Inicialmente, diseñé un sistema de frenado mecánico auxiliar basado en zapatas de freno que hacían contacto con las ruedas; estas zapatas se accionaban mediante electroimanes. Este método de frenado no es muy diferente del que se puede encontrar en los buggies ferroviarios. La elección de electroimanes como actuadores de frenado no fue para nada acertada. Estos dispositivos son poco eficientes, generan una fuerza razonable solo con carreras muy cortas y, además, consumen mucha energía (¡con el consiguiente calentamiento!).

Afortunadamente, a medida que avancé con el sistema de control de los motores (placas F5ESC, como se verá más adelante), pude determinar que las opciones de frenado eléctrico disponi-



**Figura 4.** Artesanía. Estas son las piezas construidas para resolver los guardabarros del tándem de ruedas frontales, de construcción 100% artesanal. Además, estas partes hacen que el ecoPT se ubique en la cumbre de la protección medioambiental: las partes curvas están construidas con PET reciclado de botellas de agua mineral.

bles eran muy poderosas y eficientes, bastante superiores a lo que imaginé en un principio. Por esta razón, decidí no instalar un sistema de frenado mecánico (a pesar de que ya había construido o comprado todas las partes), y opté por utilizar únicamente las funciones eléctricas disponibles. Posteriormente, ya en la tercera versión, implementé un sistema de frenado de estacionamiento mediante el posicionamiento de las ruedas frontales en una posición de bloqueo, solución que resultó ser sencilla y eficiente desde un punto de vista energético.

Entre todas las opciones de frenado mecánico que consideré, el uso de frenos de disco con calipers accionados eléctricamente merece mayor detenimiento. La principal ventaja de esta solución es la disponibilidad a bajo costo de toda la "ferretería" requerida, ya que esas partes se utilizan frecuentemente en scooters o en bicicletas de alto rendimiento.

Un método de frenado mecánico complemen-

tario podría ser conveniente en caso de que se decida desarrollar un sistema ABS o si, eventualmente, se requiriera por reglamentaciones de seguridad.

Aunque pueda parecer poco sofisticado, el método que elegí para unir a las plataformas superior e inferior terminó siendo muy satisfactorio. Las piezas construidas son planchuelas simples con montaje externo y, en la práctica, ofrecen una buena rigidez estructural y gran facilidad para montar y desmontar la plataforma superior.

Las protecciones para las ruedas las consideré en un principio como “accesorios para instalar en el futuro”, pero después de algunos ensayos en campo, tuve claro que eran absolutamente imprescindibles para evitar el ingreso de suciedad al interior del ecoPT.

Una simple “L” en acrílico fue una solución perfecta para resolver los guardabarros traseros, aunque las protecciones delanteras terminaron siendo una especie de artesanía.

Hubo dos criterios originales de diseño que no pude cumplir. Uno de ellos era que el peso total se mantuviese lo suficientemente bajo como para que el ecoPT se pueda manipular fácilmente. Inicialmente, propuse un valor objetivo en el rango de 20 a 25 kg, y la última versión tiene un peso cercano a los 55 kg. De todas maneras, hay que mencionar que este objetivo original era extremadamente optimista ya que solo las cuatro ruedas de tracción y los packs de baterías de ion-litio superan los 18 kg.

El otro criterio original de diseño que no fue posible satisfacer fue la condición de que el ecoPT se pueda transportar en el baúl de un automóvil pequeño. La primera versión cumplía perfectamente este requerimiento, pero cuando tuve que agrandar las bases debido a los problemas de inestabilidad, las dimensiones finales terminaron excediendo este objetivo.

*“Debido a que, inicialmente,*



Figura 5. Circuito de potencia eléctrica. Imagen tomada durante el montaje de la segunda versión. En primer plano se ven los cuatro packs de baterías. En el centro está ubicado el interruptor maestro accionado mediante llave y el fusible ultrarrápido. Más atrás se puede ver el contactor de alimentación del circuito de motores (aunque es poco visible debido al bajo contraste). Finalmente se ubican las barras de distribución y, cerca del fin de la plataforma, se encuentran dos placas para elevación de tensión (una para el panel solar y la otra para la alimentación de 12 V desde un vehículo); a su derecha se observa el cargador principal con entrada 220/240 VAC.

*tuve algunas dudas sobre la resistencia mecánica de las plataformas, hice algunos ensayos para estimar la deformación que podrían presentar”.*



Video 3. Ensayos

<https://www.youtube.com/watch?v=fSfgPKE74Vo>

## El sistema eléctrico

Para la selección de las ruedas/motores de tracción (uno de los componentes críticos del diseño) me basé en el criterio de que fueran “lo más estándar posible”, y por lo tanto elegí los que se utilizan en los scooters más populares del mercado.

Los motores BLDC (“sin escobillas, corriente continua”, por sus siglas en inglés) que adopté tienen una potencia nominal de 250 W cada uno (a 36 V) y pueden operar con picos de hasta 500 W. El diámetro de las ruedas es de 220 mm. Vale aclarar que los motores BLDC son similares a un motor trifásico estándar, con tres bobinados conectados en configuración estrella. El modelo seleccionado incluye un sensor integrado por efecto Hall para la realimentación de la velocidad de rotación.

Tal vez, el principal inconveniente de este tipo de motor producido en serie a bajo costo es que su eficiencia está lejos de ser espectacular y que son pocos los fabricantes que proveen información confiable de ensayos. Existe otro problema que es mucho más trivial, pero que merece ser mencionado: la calidad de las cubiertas y cámaras deja mucho por desear, y por lo tanto las pinchaduras son bastante frecuentes.

En los gráficos operacionales se puede apreciar que su eficiencia nunca supera el 75% y que en

ciertas condiciones (por ejemplo, transitorios de aceleración) este valor puede caer fácilmente por debajo del 30%.

Esta eficiencia relativamente baja se puede advertir de manera intuitiva ya que estos motores son los únicos componentes que toman cierta temperatura después de periodos prolongados de servicio.

Otro componente crítico del proyecto son los packs de baterías. Aquí, el criterio de selección fue diametralmente opuesto al anterior: “máxima calidad”. La razón de esto es muy simple: baterías de ion-litio de calidad incierta han sido responsables de gran cantidad de incidentes.

Los packs de baterías elegidos tienen una estructura 10S + 3P y están basados en la celda Panasonic 18650, la cual está muy documentada y se usa en muchas aplicaciones de exigencia elevada. Solo como referencia, puedo decir que un automóvil Tesla S está equipado con 7.776 celdas de este tipo.

El ecoPT utiliza cuatro packs de baterías con 120 celdas en total. La tensión nominal de salida es de 36 V (42 V a plena carga), y pueden entregar picos de corriente en exceso de 200 A.

De todas maneras, la corriente de descarga máxima óptima que permite tener la mayor autonomía está estimada en 48 A, valor que sigue siendo considerable.

No incorporé ningún tipo de BMS (“sistema de gestión de batería”, por sus siglas en inglés) ya que, tanto por cálculo, como por los resultados de varios ensayos, se estima que el riesgo que presentan estos packs de baterías es bajo. No obstante, prevé el lugar físico para el montaje.

Según cuáles sean las condiciones de servicio, la autonomía la estimé originalmente entre 70 y 140 minutos, valor muy superior al publicado para otros vehículos similares. Pero en la práctica este valor ha resultado ser muy superior.

A partir de los últimos ensayos realizados (con ve-

locidades de conducción entre 10 y 15 km/hr, en superficies lisas y con pendiente moderada), es posible estimar que la autonomía puede llegar fácilmente a un máximo de 8 horas, indudablemente un resultado superlativo.

Las baterías se pueden cargar mediante cuatro métodos diferentes:

- » Panel solar
- » Línea de 220/240 Vca
- » Entrada auxiliar de 12 Vcc (encendedor de un automóvil)
- » Frenado regenerativo

*"Toda la lógica de control está basada en tecnología CMOS, y el procesamiento de señales lo resolví de forma analógica, con amplificadores operacionales".*

Debido a todas estas variantes, utilizo la expresión "Hybrid-Power" para caracterizar el tipo de alimentación eléctrica implementada.

Debido a sus dimensiones limitadas, el panel solar tiene una potencia nominal de solo 50 Wep (2,7 A, 18 V), pero su aporte de energía puede ser significativo e incluso convertir el ecoPT en totalmente autosuficiente desde un punto de vista energético.

Diseñé (aunque todavía no construí) un "contador de energía solar" que emite una señal sonora (un simple beep o un mensaje breve elaborado con un sintetizador de voz) cada vez que se genera una cierta cantidad de joules (o W/h). Esto le indica al usuario claramente la energía que está ahorrando y el aporte que está haciendo al medioambiente. En caso de que se utilice un sintetizador de voz, el mensaje podría incluir palabras tales como "Ahorrando nuevamente", o "Crédito verde".

El panel solar es de tipo semiflexible y está basado en tecnología de película delgada. La hoja de datos informa una eficiencia del 21%, valor que parece ser algo exagerado. Aunque no hice las mediciones de precisión, posiblemente un valor del 19% esté más cercano a la realidad.

Es posible que una persona se pare sobre este panel sin que sufra daño y sin pérdida de rendimiento significativa; en parte, esto se debe a la película protectora seleccionada (ECTFE). De todas maneras, es imprescindible que el conductor utilice calzado con suela blanda (por ejemplo, zapatillas), y no están admitidos en absoluto los zapatos con taco duro.

He realizado algunos ensayos preliminares para validar el diseño y también efectué múltiples comprobaciones durante los ensayos operativos (ver video 3). Sin ir más lejos, instalé un voltímetro auxiliar para verificar el funcionamiento del panel solar y de su placa elevadora de tensión durante los ensayos en la vía pública.

El cargador principal está integrado en el ecoPT y, por lo tanto, el usuario no debe disponer de ningún tipo de equipo adicional o especial. Tampoco se requiere de ningún tipo de estación de carga especial, basta con un simple tomacorrientes domiciliario.

Con baterías totalmente descargadas, es posible completar la carga en 6 a 8 horas con una línea común de 220/240 Vca. Adicionalmente, está disponible una entrada auxiliar de carga a partir de una línea de 12 Vcc con conexión tipo encendedor de automóvil. Esta segunda opción es muy práctica, ya que permite cargar a las baterías del ecoPT desde cualquier vehículo.

Tanto el panel solar, como la entrada auxiliar de 12 Vcc, utilizan plaquetas elevadoras de tensión para llegar al potencial de las barras de baterías (42 V máximo). Estas placas permiten, además, limitar en forma sencilla la máxima corriente de carga.

En el panel trasero del vehículo, incorporé un in-



terruptor maestro con llave que corta todo el suministro eléctrico, y también incluí un fusible ultrarrápido para protección general.

Los motores de tracción se alimentan mediante un contactor, el cual recibe energía desde un circuito de enclavamiento sobre el cual actúan diversas medidas de seguridad (por ejemplo, interruptor de inercia, interruptor de “hombre muerto”, etc.).

Debido a que el ecoPT es un vehículo netamente experimental, decidí realizar todo el cableado de potencia utilizando un “criterio industrial” y, por lo tanto, lo estructuré en base a barras de distribución con una topología estrella para el potencial de tierra (masa). Esta característica es muy importante debido a que ese potencial es la referencia de todas las señales de control, tanto analógicas, como digitales.

Claramente, la solución basada en barras requiere mucho más espacio de instalación que alguna otra alternativa más compacta, pero ha sido de gran ayuda en las etapas de desarrollo.

La corriente de entrada/salida de los motores de tracción es una de las variables controladas más relevantes y, por lo tanto, incorporé tres métodos redundantes de medición:

- » El que implementé en las placas FSESC en base a la resistencia de encendido de los MOSFET. (Actualmente, el sistema de control no utiliza esta medición, ya que solo está disponible a través del CAN Bus de las placas FSESC).
- » Un resistor shunt clásico (100 A, 75 mV) para el multímetro instalado en el pórtico de comando.
- » Sensores por efecto Hall sin contacto para las entradas del data-logger.

También diseñé y ensayé un banco de supercapacitores formado por 16 capacitores de 60 F en serie (2,8 V nominales). La idea es que estos dis-

positivos conectados directamente a las barras de alimentación sirvan para proveer los picos de corriente requeridos durante las aceleraciones. Aún no instalé este conjunto, aunque sí está previsto el espacio para el futuro.

Para concluir este punto, añado un comentario de naturaleza 100% práctica: todo el cableado del ecoPT, tanto de potencia eléctrica, como electrónico, lo hice con conductores de tipo ultraflexible con aislación en goma de siliconas. Si bien este tipo de material tiene un costo bastante superior comparado con las opciones estándar, en la práctica ha sido muy beneficioso ya que permitió simplificar muchos detalles de instalación.

## Dirección diferencial = Una selección fallida

Ya mencioné que una de las ideas básicas de este proyecto era eliminar los comandos de tipo mecánico para tratar de materializar el concepto “Drive by Wire”, y que había elegido el método de dirección diferencial para llevar este objetivo a la práctica.

El concepto detrás de la dirección diferencial es sencillo: los vehículos convencionales giran utilizando algún tipo de rueda direccional (por ejemplo, la conocida geometría Ackermann, en la cual se basan casi todos los automóviles); pero en realidad, cuando un vehículo gira, las ruedas externas se desplazan más rápidamente que las internas y por lo tanto, si se dispone de elementos de tracción independientes a cada lado, es posible girar simplemente fijando esa diferencia de velocidades. Simplificando: si un vehículo debe girar a la izquierda, basta lograr que las ruedas derechas se desplacen más rápidamente que las izquierdas.

Entonces, es posible imaginar que si se conoce esa diferencia de velocidades no debería ser difícil determinar el radio de giro del vehículo. En

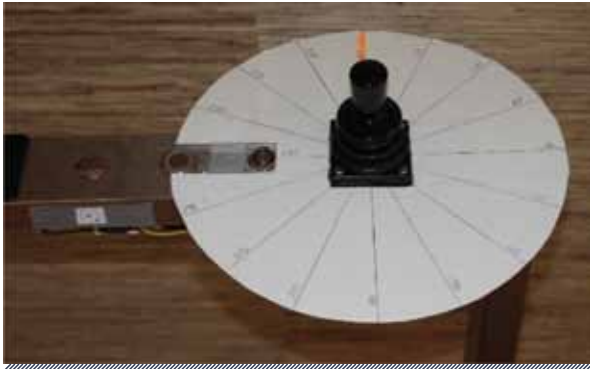


Figura 6. Super goniómetro. Puede parecer algo precario, pero este fue el disco que usé para tratar de correlacionar "donde apunta" la palanca de control vs. el radio efectivo de giro.

la práctica, lamentablemente, se presentan algunos inconvenientes que intentaré explicar con algún grado de detalle.

Actualmente, existe una enorme cantidad de bibliografía referida a este tema, en particular, debido al gran desarrollo de los AGV. No obstante, el primer análisis riguroso de esta solución se atribuye a M.G. Bekker y a su libro de 1956 titulado "Theory of Land Locomotion: The Mechanics of Vehicle Mobility".

Es importante mencionar que varios de estos análisis se hicieron respecto del desarrollo de vehículos propulsados por orugas (por ejemplo, tanques de guerra). En el libro "Theory of Ground Vehicles" (2001), J.Y. Wong también elabora ampliamente la matemática de este esquema de dirección.

Una versión simplificada de la ecuación que permite calcular el radio de giro del vehículo se puede escribir como sigue:

$$R = \frac{W (V_L + V_R)}{2 (V_L - V_R)}$$

en donde "R" es el radio de giro; "W", la trocha del vehículo; " $V_L$ ", la velocidad de ruedas izquierdas, y " $V_R$ ", la velocidad de ruedas derechas.

De la expresión anterior se puede ver que el radio

de giro es inversamente proporcional a la diferencia de velocidades entre las ruedas izquierdas y derecha ( $V_L - V_R$ ), pero también es directamente proporcional a la velocidad media del vehículo representada por el término " $(V_L + V_R)/2$ ".

En principio, se podría deducir que cuando la velocidad del vehículo es baja, se podrían lograr radios de giro muy pequeños (virajes muy cerrados), pero en la práctica se llega a situaciones de gran inestabilidad, a lo que se suman otros inconvenientes.

### Primer inconveniente

Uno de estos inconvenientes es de naturaleza casi psicológica, ya que se genera una situación que desafía la intuición del conductor. En un vehículo "normal" (un automóvil, por ejemplo), este se dirige aproximadamente hacia donde apunta el volante, y esta relación es independiente de la velocidad de desplazamiento. Para el ecoPT, la idea básica era tener un efecto análogo y, por lo tanto, tuve la intención de lograr una especie de "correlación intuitiva" entre la posición de la palanca de control y la dirección/trayectoria final del vehículo.

Claramente esto no es fácil de lograr con el método de dirección diferencial, ya que para lograr el mismo radio de giro, la palanca de control debería apuntar hacia direcciones diferentes en función de la velocidad del vehículo.

Este problema se podría resolver con algún tipo de electrónica de control o con un software de corrección (por ejemplo, usando una tabla de linealización); pero además de las complejidades involucradas, se producen algunas situaciones de alta ganancia que en ciertas condiciones pueden derivar en inestabilidades (por ejemplo, con un muy pequeño movimiento de la palanca de control, se produce un gran cambio en el radio de giro).



Figura 7. Comparación visual de bases. Derecha: primera versión, con geometría corta (trocha superior a la distancia entre ejes). Izquierda: segunda versión, con geometría cuadrada (trocha similar a la distancia entre ejes). En ambos casos, la trocha se mantuvo en 550 mm

## Segundo inconveniente

Existe otra característica que requiere un breve análisis de la estructura general del sistema. El conductor manipula la palanca de control para definir la trayectoria. Esta señal se podría denominar “set-point primario de dirección”. Esta señal es la entrada de la unidad de control (PTCU) que calcula la diferencia de velocidades que debería existir entre las ruedas derechas e izquierdas para satisfacer el pedido del conductor. Entonces, se tienen como mínimo dos señales, que se podrían denominar “set-points secundarios de dirección”, y que se van a suministrar como punto de consigna de velocidad a las placas FSESC que controlan los motores.

Estas placas, a su vez, mediante un lazo PID regulan la velocidad de rotación de cada rueda, con el objetivo de mantener una relación de linealidad perfecta entre el mencionado set-point secundario de dirección y las RPM reales con las que gira cada rueda. Este aspecto es crítico en los sistemas de dirección diferencial.

De hecho, para verificar esta relación de linealidad (y el rendimiento de la PTCU), hice varios ensayos, en los cuales utilicé un medidor de RPM por láser de reflexión para medir con una cierta precisión la velocidad que alcanzaban cada una de las ruedas.

Es entonces, que como consecuencia de lo que ya expliqué, se derivan tres inconvenientes nuevos:

- » Las placas FSESC, cuando operan en modo control de velocidad, presentan un torque de arranque muy bajo, y esto puede ocasionar algún problema si el vehículo tiene que superar un obstáculo cuando comienza a moverse (por ejemplo, una pendiente o un montículo).
- » Las constantes de ajuste del lazo PID de velocidad son bastante dependientes de las condiciones externas (por ejemplo, el peso del conductor), y por lo tanto habría que implementar frecuentemente algún algoritmo de auto-tuning o implementar alguna solución de control adaptativo para que este lazo de control siempre opere en forma óptima.
- » Cuando la PTCU calcula la diferencia de velocidades, puede eventualmente ocurrir que ese valor deba ser bastante alto para satisfacer la trayectoria solicitada. Como un ejemplo algo extremo, imaginemos una situación en la cual las ruedas izquierdas deban girar al 80% de su velocidad máxima y las derechas, a un 20%. Con diferencias de velocidad tan elevadas comienzan a notarse los efectos de interacción mecánica entre las ruedas de cada lado. Dicho simplemente: unas ruedas arrastran las otras. (No se debe confundir este efecto con el deslizamiento, que será mencionado más adelante, ya que se produce incluso si se utilizan solo dos ruedas motrices y, obviamente, esta es la razón por la cual existen los diferenciales en los automóviles). Entonces, nos encontramos en la absurda situación de estar inyectando energía en las ruedas izquierdas y retirando energía de las derechas. Esto ocurre porque las placas FSESC realmente van a estar aplicando un cierto grado de frenado a las ruedas derechas con el objetivo de satisfacer la baja velocidad solicitada.

El comportamiento descrito en el último punto está totalmente “divorciado” de la premisa de un manejo elegante y eficiente de energía con la que comenzó el proyecto.

Ensayé, también, otras alternativas de control. Una de ellas fue la inversión del sentido de rotación de las ruedas. Se trata de una opción clásica para implementar el método de dirección diferencial, y de hecho es lo que utiliza en forma muy satisfactoria el mismo ecoPT para resolver las funciones de giro pivot.

La realidad es que esta variante de control es perfectamente válida cuando se ejecuta con el vehículo inicialmente detenido; pero cuando se trata de hacer con el vehículo desplazándose a una cierta velocidad (aunque sea muy baja), se produce un comportamiento brusco y mayormente errático.

Debido a que no pude encontrar algún método para hacer que la variante de control con inversión de marcha funcione con mínimo grado de “delicadeza”, fue descartada.

*“Diseñé y construí un módulo denominado 'YCU' ('unidad de compensación de viraje'), que en la práctica funciona como un modo derivativo virtual”.*

### Tercer inconveniente

Existe un último aspecto relacionado del método de dirección diferencial que condicionó fuertemente el dimensionamiento del ecoPT.

Cuando un vehículo de cuatro ruedas gira, existen ligeras diferencias entre las velocidades de las ruedas delanteras y las traseras; esto se debe a que las ruedas no siguen exactamente la misma trayectoria. En los vehículos 4x4, este efecto se conoce como deslizamiento (slippage), y en la práctica se traduce como un cierto arrastre de al-



Video 4. Algunas limitaciones del sistema de dirección diferencial  
<https://www.youtube.com/watch?v=rBW3Ej3QL50>

guna de las ruedas durante los giros. En los que son “verdaderos 4x4”, esta situación se corrige con la incorporación del famoso “tercer diferencial”, pero incluir el equivalente a esta función en el ecoPT habría significado complicaciones adicionales.

Por lo tanto, inicialmente decidí usar una geometría de construcción en donde la separación entre las ruedas (trocha) sea mayor que la distancia entre ejes. Esta selección minimiza el efecto de deslizamiento.

En la primera versión, adopté esta solución, pero fue un exceso de optimismo, porque en la práctica, el centro de gravedad del conductor terminó cayendo en una posición muy cercana al eje trasero. Esto tuvo por consecuencia que el vehículo se comportase en forma muy inestable durante la aceleración (¡incluso con aceleraciones pequeñas!). Tales inestabilidades fueron las que me llevaron a la construcción de la segunda versión, ya a comienzos del tercer trimestre de 2020.

La nueva versión seguía utilizando el sistema de dirección diferencial, pero adopté para ella lo que se conoce como una “base de ruedas cuadrada”, en donde la trocha es aproximadamente igual a la separación entre ejes. Esta segunda ver-



sión mostró un gran aumento de la estabilidad y, por lo tanto, la conducción pasó a ser segura.

El video 4, filmado durante uno de los ensayos preliminares de la primera versión, muestra algunas de las limitaciones del sistema de dirección diferencial y de las situaciones de inestabilidad asociadas con la base de geometría corta.

*"Este desarrollo también pone en evidencia el enorme poder de las fuentes públicas de información disponibles actualmente que ayudan a mitigar (en parte) la mencionada falta de conocimiento".*

#### Intentos fallidos de solución

Durante los últimos meses de 2020, llevé a cabo muchos ensayos tendientes a optimizar la técnica de dirección diferencial. El procedimiento típico de prueba era seguir trayectorias predefinidas trazadas en el piso de un patio, cada una de ellas con distintos radios de giro. Durante estos ensayos, incluso llegué a montar en forma temporal en el pórtico de comando un conjunto de instrumentos que permitían verificar en tiempo real que los valores de velocidades calculados por la PTCU fueran razonables.

Lamentablemente, se hizo evidente que era muy difícil (o imposible) lograr giros de "precisión quirúrgica" utilizando esta técnica de dirección, y claramente esta característica es imprescindible si el ecoPT se va a utilizar por calles o veredas compartidas con peatones.

Debo decir que durante las etapas iniciales del proyecto estaba fuertemente convencido de que la tecnología de dirección diferencial era la solución más elegante para implementar el concepto "Drive by Wire". Esta es la razón por la cual inten-

té adoptarla, tanto en la primera, como en la segunda versión.

A fines de 2020, debido a todos los inconvenientes descriptos y a la dificultad para imaginar una solución (relativamente) simple, decidí abandonar definitivamente el esquema de dirección diferencial a favor de una unidad electrónica servoactuada de dirección. Esto lo explicaré en detalle más adelante.

Es claro que varios vehículos que están disponibles actualmente (por ejemplo, desde algunas sillas de ruedas hasta el famoso segway, aunque no los AGV, que han mostrado un comportamiento nervioso) implementan la tecnología de dirección diferencial con gran eficiencia, pero en casi todos los casos se trata de vehículos que solo tienen dos ruedas motrices. ■■

#### Nota del editor.

El presente artículo continúa con una descripción detallada del sistema de control, así como de los drives, del comando, y de las cuestiones reglamentarias, entre otros aspectos de relevancia que fue necesario desarrollar para la versión final del ecoPT. La versión completa del artículo se puede leer y descargar en:

[https://www.editores.com.ar/autor/luis\\_buresti/20210707\\_cronica\\_de\\_la\\_idea\\_desarrollo\\_y\\_construccion\\_de\\_un\\_vehiculo\\_electrico](https://www.editores.com.ar/autor/luis_buresti/20210707_cronica_de_la_idea_desarrollo_y_construccion_de_un_vehiculo_electrico)

# Crónica de la idea, desarrollo y construcción de un vehículo eléctrico

El sistema de control, los drives, el comando y las cuestiones reglamentarias, entre otros

Luis Buresti  
[luis.buresti@gmail.com](mailto:luis.buresti@gmail.com)

Proyecto ecoPT  
<https://www.youtube.com/watch?v=-Ps5cx3Nhpk>

## El sistema de control

Una vez más, atendiendo al hecho de que los recursos de equipamiento disponibles localmente son muy limitados, decidí construir toda la electrónica de control en base a tecnologías convencionales.

Esto significa, concretamente, que toda la lógica de control está basada en tecnología CMOS, y que el procesamiento de señales lo resolví de forma analógica, con amplificadores operacionales.

La mayor parte de las funciones de control las podría haber implementado mediante algún microcontrolador estándar (por ejemplo, Arduino, Raspberry-Pi o similar), pero esta alternativa habría sido más difícil de validar y, sobre todo, más susceptible a problemas de ruido eléctrico. De todas maneras, es evidente que este es el camino a seguir en caso de que se decida construir algún tipo de "prototipo definitivo".

Una de las unidades desarrolladas es la que se denomina "PSL+L" ("Power Safety Latch & Logic"), que controla el contactor que alimenta las barras de distribución de energía de los motores, y lo desactiva en caso de existir alguna anomalía (por ejemplo, la detección de un impacto o caída accidental del conductor).

Esta unidad también controla la selección de marcha adelante/marcha atrás en forma coordinada con las funciones de giro pivot, que permiten que el ecoPT rote sobre su propio eje vertical, tanto en sentido horario, como antihorario. El giro pivot fue incluido como un ejemplo de "maniobras especiales".

Además de esta, se podrían desarrollar otras funciones similares en el futuro; una de ellas podría ser "spinning". La idea detrás de estos "efectos especiales de conducción" es satisfacer la premisa de "conducción divertida".

La placa PTCU ("Powertrain Control Unit") recibe el set-point de velocidad desde la palanca de control y genera las señales que se envían a las



Figura 8. Algunos sensores del ecoPT. Izquierda: sensor de corriente por efecto Hall. Centro: giroscopio MEMS para corrección de virajes. Derecha: acelerómetro de triple eje, para detectar condiciones de impacto.

placas F5ESC. Controla, también, las funciones de frenado. Esta unidad incluye los ajustes para las velocidades del giro pivot, los cuales son necesarios para que esta función opere con suavidad.

Tanto la unidad de control de velocidad de los motores (placas F5ESC), como la unidad de posicionamiento del mecanismo de dirección se describen más adelante debido a sus características especiales.

También diseñé y construí dos placas periféricas. Una de ellas es la SCU (del inglés, "unidad de control de señalización"), la cual comanda todas las luces y señales sonoras, y la CGI (del inglés, "interfaz de pórtico de comando"), cuyo propósito es simplificar las conexiones con el pórtico de comando.

En la tercera versión, adopté niveles lógicos de 12 V (originalmente, eran de 5 V). Esto resolvió algunos problemas menores de ruido eléctrico que existían.

Preví, también, la instalación de un data-logger ("la caja negra") con cuatro canales analógicos de entrada. Este dispositivo permitirá registrar la velocidad del ecoPT, de la corriente a los motores de tracción, de la corriente producida por el frenado regenerativo y de la generación del panel solar.

Construí las placas de control de manera totalmente "artesanal", y esto tuvo como consecuencia que aparecieran varios casos de falta de confiabilidad, todos detectados durante la puesta en marcha. Estas fallas, se debían típicamente a fal-

tos contactos o soldaduras frías. Muchos de estos problemas fueron corregidos, pero seguramente debe haber muchos más aún latentes.

Un nuevo comentario 100% práctico: en todas las plaquetas de control, usé leds para indicar visualmente el estado de las señales lógicas. Quizá abusé del recurso y ahora parece un "árbol de Navidad", pero en la práctica esta información visual fue una ayuda enorme durante las etapas de puesta en marcha.

## Los drives

La función de las placas drives es el "simple" control de la velocidad de rotación de los motores de tracción. En el "gremio" de instrumentación y control, se las conoce como "variable frequency drives" ("drives de frecuencia variable") o simplemente "drives".

Desde el inicio del proyecto ecoPT, tuve muy claro que estas unidades eran otro de los eslabones críticos y, por lo tanto, hice un análisis bastante pormenorizado de los productos disponibles.

Primero, y solo en función de mis propios antecedentes profesionales, analicé la oferta disponible en el mercado industrial. Todos los productos relevados tenían gran funcionalidad, alto rendimiento, múltiples certificaciones de calidad y excelente documentación. Físicamente, eran productos relativamente grandes y con costos significativos.

Estudí también la disponibilidad de estos productos para el mercado OEM. En este sector, en general, los fabricantes integran estos dispositivos en maquinaria de su propia fabricación.

Todos los productos que analicé eran tipo "board level" y, en términos generales, menos flexibles que los anteriores. Pero hay un detalle muy importante: en algunos casos, la relación de precios llegaba a ser 10:1 entre las soluciones industriales y las OEM.

Por último, analicé lo que podría llamarse “mercado amateur”. Esta es una categoría algo difícil de definir, pero allí se pueden encontrar desde constructores de robots con fines didácticos, hasta entusiastas de los vehículos eléctricos modificados, pasando por pequeños fabricantes de máquinas especiales y constructores de modelos radiocontrolados.

Como era de esperarse, los proveedores que participan de este mercado son muy variados, desde algunos que ofrecen productos de calidad muy dudosa y con documentación muy escasa, hasta otros que parecen haber desarrollado tecnologías interesantes.

No obstante, muchos productos desarrollados para el mercado amateur se hacían atractivos simplemente por tener relaciones de precios de aproximadamente 5:1 con respecto a aquellos para el mercado OEM.

Para el proyecto ecoPT, elegí un drive desarrollado para aplicaciones amateurs. La selección la hice más en base a evidencia circunstancial, que en base a datos duros, pero se puede decir que terminó siendo muy satisfactoria.

No es la idea comparar “perros y gatos”, pero es necesario mencionar que la relación de precios de casi 50:1 que se da entre los productos industriales y los de aficionados es por cosas que esencialmente tienen la misma función. (Esta relación de precios fue decisiva para decidir la selección inicial, ya que si eventualmente la placa no funcionaba, era relativamente poco lo que se perdía.)

Tal vez, esta situación se podría considerar como un buen ejemplo de “low cost automation” (“automatización de bajo costo”), bastante en línea con los conceptos que rondaban en los congresos de IFAC (Federación Internacional de Control Automático, por sus siglas en inglés).

La placa de control que elegí para los motores BLDC (modelo FSESC 4.12) permite operar con corrientes en régimen continuo de 50 A y corrientes de pico de hasta 240 A, ambos valores muy

por encima de lo que requieren los motores seleccionados. Este dispositivo utiliza un firmware y un software de interfaz (ambos de tipo fuente abierta) desarrollados por un ingeniero sueco brillante llamado Benjamin Vedder.

Sería muy largo detallar todas las prestaciones y características de las unidades FSESC, pero la más relevante es que operan en base a una tecnología de control vectorial, muy conocida en el sector industrial (“Field Oriented Control”, “control orientado al campo”).

El control vectorial es, indudablemente, el mejor y más eficiente método para la operación de motores BLDC. Esta tecnología fue desarrollada originalmente por investigadores de la Universidad de Darmstadt (Alemania) y de la firma Siemens a fines de los años ‘60, y fue la que abrió el camino para el uso generalizado de los drives de frecuencia variable en el campo industrial.

La configuración de las placas FSESC se simplifica mucho gracias al software de interfaz disponible, el cual es muy intuitivo y flexible. Este programa incluye herramientas para autorreconocimiento de los parámetros eléctricos del motor (resistencia e inductancia de los bobinados, flujo magnético) y algoritmos de auto-tuning para la determinación de los parámetros óptimos de los controladores PID internos. También incluye varias funciones de monitoreo en tiempo real, las cuales son muy útiles para detectar posibles problemas y para optimizar la operación.

Existen también algunos aspectos negativos. Uno de ellos, lo describo con un cierto grado de humor en el punto siguiente.

Otro inconveniente es que el software (tal vez por estar orientado mayormente a usuarios no profesionales) muchas veces denomina ciertos parámetros o funciones con una terminología bastante distinta a la que se utiliza en el ambiente industrial, y esto obliga a decodificar ciertos conceptos. Este proceso requiere de bastante tiempo e incluso puede inducir a errores.



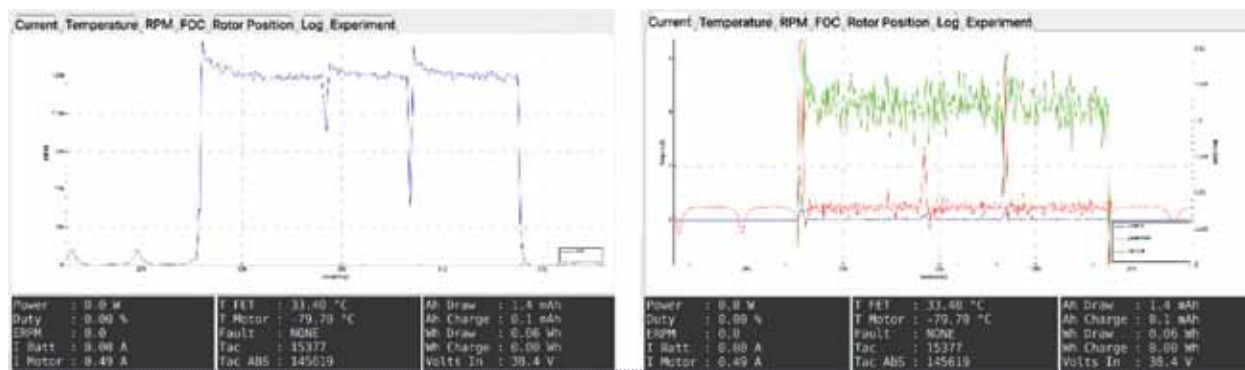


Figura 9. Lazos de control en las unidades FSESC. Izquierda: gráfico de ERPM vs. tiempo en modo control de velocidad. La curva muestra la estabilización luego de un salto escalón inicial y luego de dos perturbaciones. Derecha: gráfico de los parámetros eléctricos del motor BLDC en modo de control vectorial. Este ensayo fue realizado en aproximadamente 16% FS (ERPM).

La documentación disponible es escasa y requiere de mejoras.

Algunas cosas que deberían ser extremadamente simples de resolver (como la conexión de un componente periférico) pueden requerir el intercambio de una buena cantidad de correos para aclarar mínimamente los detalles.

Hay muchas opciones y parámetros que se pueden configurar con las placas FSESC, tal vez la más importante es el modo primario de control.

Cuando utilizaba la técnica de dirección diferencial, el modo de control debía garantizar la linealidad entre la señal de entrada y la velocidad de las ruedas, pero cuando cambié por la técnica de ruedas direccionales, configuré esta opción de modo tal que la variable primaria controlada sea la corriente de los motores. Se debe tener en cuenta que el torque erogado por los motores es función directa de esta corriente.

Esta nueva selección tuvo varias consecuencias positivas. Una de ellas fue un arranque suave gracias al alto torque inicial. Esto asegura que el ecoPT comienza a moverse sin dificultad incluso ante la presencia de una pendiente o de un obstáculo.

Otro beneficio indirecto del control en corriente es que actúa como diferencial virtual, asegurando las velocidades correctas de las ruedas de cada lado al girar y, por lo tanto, minimiza el efecto de deslizamiento.

Asociadas a las placas FSESC, desarrollé otras denominadas VMDU (del inglés, "unidad de detección de movimiento del vehículo). Estas unidades utilizan el sensor de efecto Hall integrado en los motores BLDC, y generan dos señales:

- » Una salida lógica que detecta si el vehículo está en movimiento
- » Una señal analógica o en frecuencia proporcional a la velocidad

Debido a limitaciones de espacio, las VMDU solo las instalé en las ruedas traseras. En el futuro, las salidas de estas unidades serían utilizadas también para implementar un sistema de frenado con función ABS.

### La ignorancia siempre es costosa

Las placas FSESC incluyen, indudablemente, muchos detalles técnicos de excelencia, pero con una evidente intención de mantener bajos los costos del hardware, prescindí de todo tipo de protecciones en las entradas y salidas. Esta característica puede generarle serios problemas a quien las utiliza por primera vez.

Durante las primeras etapas de desarrollo del ecoPT, hice varios ensayos para evaluar las placas



Video 5.

<https://www.youtube.com/watch?v=lfygmz2MKS8>

FSESC, todos sin mayores contratiempos y con resultados satisfactorios. En este momento es posible decir que estuve frente a un claro caso de "suerte de principiante" (ver video 5).

Lamentablemente, cuando comencé a instalar las FSESC en el primer prototipo, la suerte cambió. Durante un periodo de unos quince días, cuatro de estas placas fallaron en forma catastrófica. Hay que decir que esto se debió más a una combinación de improvisación e ignorancia de mi parte que a vicios ocultos de estas unidades.

Hubo todo tipo de errores, desde simples contactos accidentales (la primera placa falló por un toque instantáneo entre la masa del motor y un pack de baterías), hasta reiteradas fallas por falta de entendimiento de las interfases eléctricas.

La placa FSESC está basada en el microcontrolador STM32F-405 que opera con niveles lógicos de 3.3 V y que claramente no admite la menor transgresión de esos valores. Esto significa que, como mínimo, se deben cumplir dos condiciones:

- » Nunca una línea de entrada/salida puede recibir un potencial fuera del rango -0,3 a 3,3 V
- » Nunca una línea de entrada/salida puede estar activa sin que el microcontrolador esté energizado

El problema era que el diseño original violaba ambas condiciones, debido a que toda la lógica

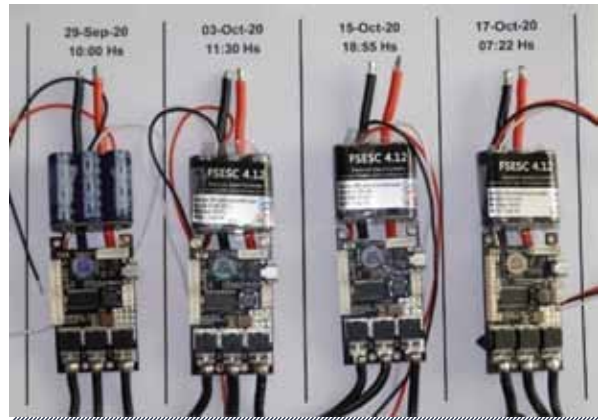


Figura 10. Una imagen triste. Estas son las cuatro placas FSESC que fueron "brutalmente asesinadas" durante la puesta en marcha de la primera versión del ecoPT. El móvil del crimen fue muy simple: una inoportuna combinación de improvisación e ignorancia.

funcionaba con 5 V y que, además, todas las unidades de control recibían tensión antes de que recibieran energía las placas FSESC.

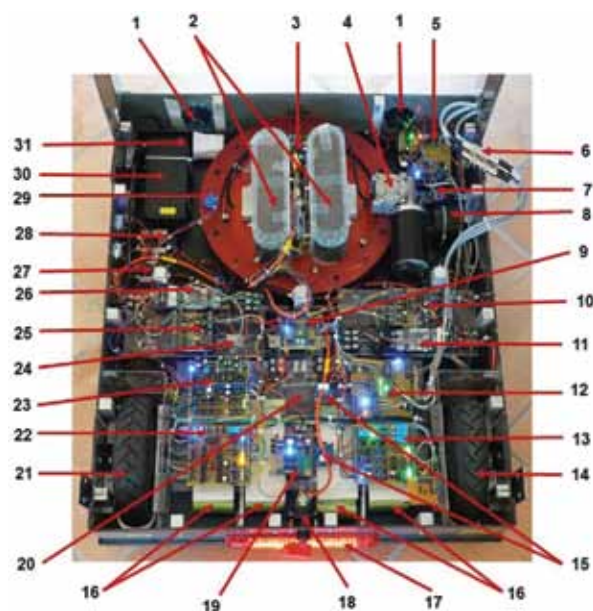
Afortunadamente la solución fue muy simple. Solo bastó con incorporar un par de dispositivos aisladores de señal entre las placas de control y las FSESC, alimentados desde una salida auxiliar de las propias FSESC. En la práctica, esto lo materialicé solamente con seguidores de tensión.

Ahora que ya ha sido explicada, toda esta secuencia de eventos parece muy sencilla; pero en la realidad, todo esto fue una de las etapas más frustrantes del proyecto. Aquí la moraleja es bastante clara y simple: la improvisación combinada con ignorancia siempre es muy costosa.

## El pórtico de comando

El pórtico de comando cumple una doble función:

- » Lugar de montaje de todos los elementos de comando y medición
- » Estructura desde la cual el conductor se sostiene mientras conduce.



**Figura 11. Componentes eléctricos y electrónicos**

- |  |  |
|--|--|
| 1. Faroles led frontales                             | 17. Luz de posición trasera más luz de freno                 |
| 2. Motores de tracción frontales                     | 18. Interruptor maestro accionado con llave                  |
| 3. Drives FSESC y placas de interfaz frontales       | 19. Placa de PWM y puente-H-para servomotor                  |
| 4. Servomotor de dirección                           | 20. Contactor de alimentación de motores                     |
| 5. Unidad de control de luces y alarmas (SCU)        | 21. Motor de tracción trasero-izquierdo                      |
| 6. Conectores M16 para cables del pórtico de comando | 22. Unidad de enclavamiento y lógica (PSELLU)                |
| 7. Fuente switching para la SCU (12 V)               | 23. Unidad de control de la servo-dirección (SSU)            |
| 8. Alarma de retroceso                               | 24. Resistores shunt para la medición de la corriente        |
| 9. Unidad de compensación de viraje (YCU)            | 25. Unidad de detección de movimiento del vehículo (VMDU)    |
| 10. Unidad de detección de movimiento del vehículo   | 26. Drive FSESC trasero-izquierdo                            |
| 11. Drive FSESC trasero-derecho                      | 27. Placa elevadora de tensión para entrada auxiliar de 12 V |
| 12. Unidad de interfaz con el pórtico de comando     | 28. Placa elevadora de tensión para el panel solar           |
| 13. Unidad de control de tracción (PTCU)             | 29. Realimentación de posición para servo de dirección       |
| 14. Motor de tracción trasero-derecho                | 30. Cargador de baterías (220/240 V)                         |
| 15. Sensores de corriente por efecto Hall            | 31. Bocina   |
| 16. Conjuntos de baterías de ion-litio (10 S/3 P)    |  |

En el caso del prototipo que desarrollé, el diseño del pórtico de comando estuvo fuertemente condicionado por las posibilidades locales de fabricación.

La base del diseño es la palanca de control, la cual posee tres funciones:

- » Control de velocidad de avance o retroceso
- » Accionamiento de los frenos, incluido el freno de estacionamiento
- » Control de dirección

La operación de la palanca de control requiere cierta habilidad manual por parte del conductor, ya que comanda, tanto la velocidad, como la dirección del vehículo. Esto podría, inclusive, ser considerado como una debilidad del diseño, ya que cuando se encuentra alguna irregularidad en el camino (por ejemplo, un bache o una loma), se pueden producir movimientos involuntarios en la mano del conductor, los que a su vez podrían

producir cambios erráticos en la dirección del vehículo.

Existen varias posibilidades para minimizar este efecto, una de ellas fue el desarrollo de la YCU (unidad de compensación de virajes, por sus siglas en inglés), como se verá más adelante.

En el pórtico de comando también se ubica el pulsador que permite seleccionar las marchas adelante/atrás (\*) y los pulsadores que controlan las maniobras especiales. Una alarma sonora clásica de retroceso indica el estado de la selección. Un multímetro eléctrico (tensión y corriente de batería, potencia erogada, estimación de autonomía, etc.) y un computador GPS de velocidad y distancia completan el esquema.

La vinculación eléctrica entre la electrónica de control y el pórtico de comando, la hice mediante tres cables múltiples (3 x 6 conductores cada uno) que incluyen conectores M16 para facilitar un desarme rápido. En el futuro, este enlace se podría resolver con CAN Bus (solo tres conductores).

## Un cambio estratégico: de dirección diferencial a ruedas direccionales

Según lo que expliqué más arriba, tanto en la primera, como en la segunda versión, utilicé la técnica de dirección diferencial, y aunque se pueda considerar como “cambiar de caballo en el medio del río”, a fines de 2020, decidí migrar a un esquema de ruedas frontales servoposicionadas, decisión respaldada por las razones que ya mencioné antes.

## Un cambio estratégico: de dirección diferencial a ruedas direccionales

Según lo que expliqué más arriba, tanto en la primera, como en la segunda versión, utilicé la técnica de dirección diferencial, y aunque se pueda considerar como “cambiar de caballo en el medio del río”, a fines de 2020, decidí migrar a un esquema de ruedas frontales servoposicionadas, decisión respaldada por las razones que ya mencioné antes.

El conjunto de dirección que diseñé difiere mucho de otras alternativas disponibles. Está estructurado a partir de un engranaje plano de dientes rectos (300 mm de distancia) sobre el cual se monta el tándem de motores de tracción, en cuyo espacio intermedio se ubican las placas de control (FSESC) e interfaz.

El mencionado engranaje, a su vez, está montado entre dos aros de aluminio de calidad aeronáutica (aleación 7075 T6, distancia de 368 mm), que conforman la estructura principal del conjunto.

La fuerza axial (por ejemplo, peso del vehículo más peso del conductor) se toma mediante un conjunto de dieciséis minirrodamientos de bolas montados en las caras internas de los aros. Entre los aros, también ubiqué cuatro engranajes (30 mm) cuya función es centrar el engranaje del plano principal.



Figura 12. Pórtico de comando

- |  |   |
|--|---|
| 1. Interruptor de “hombre muerto”                | 7. Multimetro V + I + P + autonomía             |
| 2. Pulsador marcha adelante/marcha atrás         | 8. Giro pivot (sentido horario)                 |
| 3. Bocina  | 9. Alimentación de motores más leds de estado   |
| 4. Corte de alimentación eléctrica a los motores | 10. Faros frontales y luz roja de posición      |
| 5. Giro pivot (sentido antihorario)              | 11. Palanca de control de velocidad y dirección |
| 6. Velocímetro/odómetro GPS                      |   |



Figura 13. Dirección servoperada. Arriba: típica unidad de tracción y dirección como la que se emplea en algunos vehículos robóticos. El conjunto de la imagen pertenece a la empresa Allied Motion, de Estados Unidos. Abajo: motor seleccionado para el conjunto servoperado de dirección, que se utiliza normalmente en puertas operadas automáticamente.





**Figura 14.** Conjunto de dirección electrónica servoperada. Vista del nuevo conjunto de dirección ya instalado en la plataforma inferior del ecoPT. En el centro se ubican los dos motores de tracción junto a la correspondiente electrónica de control. A la izquierda se observa el servomotor. La pieza azul que se aprecia a la derecha es el potenciómetro multivuelta para realimentación de posición.

Tanto el servomotor como el potenciómetro multivuelta de precisión para realimentación de posición están montados sobre el aro superior. El servomotor también incluye un encoder digital que se puede usar como sensor alternativo de realimentación de posición.

Todas las piezas de aluminio fueron anodizadas en color rojo a los efectos de lograr el pasivado de las superficies. El conjunto fue calibrado para operar en el rango de  $-45$  a  $45^\circ$ , que es el que se utiliza para las funciones normales de dirección y, además, se puede forzar a posiciones extremas de  $-90$  o  $90^\circ$  para las funciones de giro pivot. El límite de  $90^\circ$  también es utilizado por el freno de estacionamiento.

El servomotor que seleccioné es de "calidad comercial" y es un producto normalmente destinado al accionamiento de puertas automáticas. Es un motor convencional con escobillas, con una potencia nominal de 100 W (24 V). La velocidad de salida de su caja reductora es de 220 rpm. Considerando esa velocidad y la relación adi-

cional de desmultiplicación que introducen los engranajes de la unidad, se tiene un tiempo total de accionamiento de aproximadamente 0,68 segundos para la excursión de  $-45$  a  $45^\circ$ , tiempo que probó ser ampliamente satisfactorio.

El posicionamiento del servomotor se efectúa mediante una placa denominada SSU (unidad de posicionamiento de la dirección servoperada, por sus siglas en inglés). La primera versión de la placa SSU la diseñé y construí en base a una estrategia de control que podría ser denominada "on-off con banda muerta ajustable". La sencillez y la velocidad de construcción fueron determinantes para tomar esta decisión.

La SSU inicial operaba en forma satisfactoria, pero durante los ensayos en calles se hizo notorio que era necesario fijar la banda muerta en un mínimo de  $\pm 3\%$  para que no oscilara el servomecanismo. Este valor, a su vez, se traducían en un "ángulo muerto" del servomecanismo de aproximadamente  $\pm 3^\circ$ .

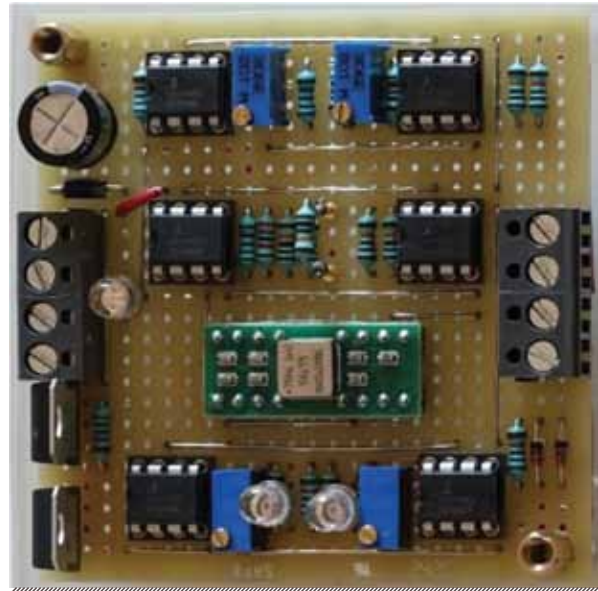
En la práctica, este valor se hizo muy peligroso ya que, si eventualmente el servo había quedado posicionado en uno de los extremos de la banda muerta, y el conductor manipulaba la palanca de control en la dirección contraria, el servomecanismo excursionaba bruscamente unos  $6^\circ$  con la consiguiente desestabilización del vehículo. Inclusive a velocidades muy moderadas (6 a 8 km/h) esta respuesta era inaceptable.

En base a estos resultados experimentales, decidí construir una nueva versión de la placa SSU utilizando el clásico modo de control PID. La etapa de entrada incluye los acondicionadores de señal y un amplificador diferencial para calcular la señal de error.

Implementé el algoritmo PID con un circuito tradicional basado en amplificadores operacionales. Cada modo de control cuenta con cuatro rangos seleccionables. La etapa de salida incluye un separador de señal para convertir los niveles internos bipolares en salidas de 0 a 5 V, y también



**Figura 15.** "Orgía" analógica. Este es el sobrenombre que se le dio a la nueva placa SSU que controla el posicionamiento del servomecanismo. Es tecnología clásica de inicios de los años '80, pero en la práctica se ha comportado muy eficientemente. Incluye quince amplificadores operacionales (CA-3140), tres DIP switches, cuatro interruptores analógicos SPDT (DG-419), dieciséis trimpots, un relay y el conjunto de fuentes  $\pm 12$  y  $+5$  V para referencias. La alimentación general es de 24 V.



**Figura 16.** Placa YCU. En la parte superior, los circuitos integrados requeridos para implementar las interfaces y para el ajuste de ganancia. El sensor ADXRS-623 es el pequeño cuadrado plateado. Este componente tiene terminales con tecnología "Ceramic Ball Grid Array", que lo hace totalmente inutilizable por un desarrollista amateur. Afortunadamente, también está disponible montado en una pequeña plaqueta, como se observa en la imagen.

incluye los límites de carrera ajustables. Una simple lógica permite forzar las posiciones del servomecanismo en los valores extremos de  $-90$  y  $90^\circ$ . Una placa auxiliar convierte las salidas analógicas de control a pulsos mediante dos circuitos PWM, e incluye un puente H estructurado con MOSFET para la alimentación del servomotor.

Esta nueva versión de la placa SSU se comportó increíblemente bien desde el inicio, brindando un ajuste rápido, estable y preciso del servomecanismo de dirección.

La solución adoptada con ruedas direccionales tiene, además, otras dos características interesantes:

- » Compatibilidad con las funciones de giro pivot
- » Posibilidad de trabar las ruedas frontales en la posición  $90^\circ$ , lo que resulta en un simple freno de estacionamiento que no requiere energía de mantenimiento.

## Compensación de viraje

Ya mencioné que un movimiento no intencional de la mano del conductor puede resultar en un cambio brusco en la trayectoria del ecoPT. En realidad, esta perturbación también puede ser consecuencia de algún obstáculo encontrado en el camino o de un cambio en el agarre de las ruedas al piso (por ejemplo, la clásica situación de tener dos ruedas en un camino asfaltado y las otras dos sobre pasto).

Muchos automóviles modernos enfrentan estos efectos con sistemas que tienen denominaciones tales como "control activo de viraje", "programa de estabilidad electrónica" (ESP), y similares.

La placa SSU descrita incluye el modo de control derivativo, el cual puede ser útil para compensar perturbaciones introducidas por la mano del conductor, pero no puede reaccionar ante otras interferencias. Entonces, diseñé y construí

un módulo denominado "YCU" ("unidad de compensación de viraje"), que en la práctica funciona como un modo derivativo virtual. La siguiente fórmula intenta explicar el concepto:

$$V_{xe} = V_x - G \frac{d\psi}{dt}$$

en donde " $V_{xe}$ " es la entrada efectiva a la placa SSU; " $V_x$ ", el set-point de dirección; " $G$ ", el factor de ganancia ajustable; " $d\psi/dt$ ", la velocidad de viraje ( $^{\circ}/s$ ).

La acción introducida por la YCU simplemente consiste en sumar un término que depende de la velocidad de viraje del vehículo al set-point originado en la palanca de control, o sea, la trayectoria solicitada por el conductor.

Los giros en sentido horario son positivos y los antihorarios, negativos. De esta manera el set-point de dirección se corrige en la fuente, antes de ser ingresado en la unidad SSU.

La electrónica que desarrollé se basa en el sensor giroscópico ADXRS-623, el cual está basado en tecnología MEMS y entrega una salida que a velocidad de giro nula está en el 50% de la escala, y varía proporcionalmente a dicha velocidad.

El sensor lo instalé en el centro de la plataforma inferior en una posición que intenta estar alineada con el eje vertical del conductor.

La placa YCU ya fue ensayada en condiciones de campo con resultados satisfactorios. No obstante, se estima que aún se requiere un cierto grado de optimización.

El sensor giroscópico tiene una alta relación de rechazo a aceleraciones en los otros ejes; no obstante, se han notado algunas interacciones no deseadas cuando el ecoPT "choca" con alguna irregularidad mayor del camino. Es precisamente este efecto el que debe mejorar, y es muy probable que esto se pueda lograr mediante el ajuste del ancho de banda.

Una vez más, una observación práctica: durante

los ensayos en calles de la YCU, puede no ser fácil interpretar las correcciones que introduce el llamado "efecto de control". Esto se podría ver con instrumental adecuado, pero esta solución es compleja y no está disponible en este desarrollo. Entonces, la YCU la construí incluyendo dos simples comparadores que detectan cuando la intervención de la YCU supera un cierto umbral. Estas salidas, luego se convierten en un "beep" en la SCU, y este sonido le brinda al conductor una clara señal acerca de la intervención de la YCU.

## Algunas consideraciones reglamentarias

Al presente, no tengo una idea clara acerca de cómo sería el "encuadramiento legal" del ecoPT, si es que alguna vez fuera a circular "oficialmente" por la vía pública.

Los monopatines eléctricos no requieren ningún tipo de licencia ni edad mínima, aunque algunos países o regiones fijan un mínimo de dieciséis años.

Estos vehículos, en general, están limitados a una potencia máxima de 250 W. En Europa (particularmente en Alemania) hay reglamentaciones que cubren a los llamados "PedElecs" (básicamente, bicicletas que tienen un motor eléctrico de asistencia), pero están también limitadas a 250 W, y el motor solo puede funcionar cuando el usuario tiene los pies ubicados sobre los pedales.

Tampoco estudié las reglamentaciones en base a las cuales se diseñó el segway, ni las certificaciones que posee, pero es notorio que para conducirlo es obligatorio utilizar casco.

Con respecto a las sillas de ruedas eléctricas y los triciclos de cortesía (los que típicamente se pueden encontrar en algunos centros comerciales) es muy probable que tengan encuadramientos tipo "uso profesional" (o alguna calificación similar) y, por lo tanto, las reglamentaciones son mucho

más permisivas, fundamentalmente en cuanto a potencia o permisos de uso.

De todas maneras, todos estos vehículos (y esto sería “sin excepción”) están limitados a una velocidad máxima de 25 km/hr. A pesar de esto, es frecuente observar vehículos eléctricos modificados que pueden viajar mucho más rápido que ese límite. Es habitual, incluso, verlos transitando por rutas nacionales.

Finalmente, se puede decir que es casi seguro que este tipo de vehículo deba cumplir con los lineamientos de la Norma IEC (EN) 61000 respecto a compatibilidad electromagnética y de la Norma UNECE R-100 respecto al tema de seguridad de baterías de ion-litio o similares.

## Posibles mejoras o modificaciones

Sometí el ecoPT a muchas horas de ensayos transitando en la vía pública, en superficies tales como veredas, bicisendas, pasarelas, calles y avenidas. En términos generales, se puede decir que se comporta según lo previsto, y en algunos aspectos incluso mejor. No obstante, hay algunos detalles del diseño y de la construcción que deberían ser objeto de mejora en caso de que se decida elaborar un prototipo avanzado.

- » Cuando hice el diseño mecánico, una de las ideas fue lograr que las ruedas no sean fácilmente visibles. El objetivo era dar la impresión de que la plataforma inferior estaba “flotando en el aire”. Para lograr esto, básicamente mantuve muy bajo el despeje respecto al piso. Ese valor, actualmente, es de unos 85 mm. Lamentablemente, por esta característica, es frecuente que la plataforma inferior toque el piso ante una irregularidad del camino (por ejemplo, una canaleta o un montículo). Claramente, esta dimensión se debería incrementar unos 40 o 50 mm, pero esto a su vez podría degradar algo la estabilidad del vehículo, o sea que es un cambio que se debe introducir con precauciones. El bajo despeje también implica que la circulación “off-road” está descartada, al menos por el momento.
- » Mencioné varias veces que la palanca de control es un comando multifunción que controla la velocidad de avance, la intensidad de frenado y la dirección del vehículo. Si bien esto parece ser una buena elección, ya que se ahorra componentes, también está claro que esta característica hace que se requiera una cierta habilidad manual por parte del conductor y que pueda ser fuente de algún problema cuando se conduce a una velocidad algo elevada y se encuentra una irregularidad del camino, con el consiguiente movimiento involuntario de la mano del conductor. En la práctica, ya consideré esta situación con el desarrollo de la YCU, no obstante, se podrían también imaginar otras alternativas, como las siguientes:
  - Rediseño de la estructura de comandos con separación de las funciones de control de velocidad y control de dirección.
  - Introducción de algún tipo de función de caracterización entre la salida de la palanca de control y la entrada de la SSU en forma análoga a lo que hacen los sistemas de dirección progresiva (a veces también llamados “dirección activa”). Esta función, básicamente, debería tener baja ganancia en la zona de reposo de la palanca de control, y luego aumentar dicha ganancia a medida que la palanca de control se aleja del centro.
  - Uso de una palanca de control mucho más robusta, de “calidad industrial”.
  - Combinación de todas las opciones mencionadas.
- » Hay mucho por reconsiderar respecto del pórtico de comando, en particular en lo referido a su estética y ergonomía. La primera debe ser mejorada para lograr una imagen





Figura 17. Vistas de los cuatro laterales. Imágenes del ecoPT según construcción. Las fotos superiores muestran los paneles frontal y trasero. La imagen inferior izquierda es del lateral que incluye las conexiones eléctricas para 220/240 Vca y para 12 Vcc (encendedor de automóvil). También se observan los voltímetros auxiliares para la medición de la tensión de baterías y de las tensiones de carga vinculadas con el panel solar o con la entrada auxiliar de 12 Vcc. La imagen inferior derecha muestra el lateral donde se conecta el panel solar mediante un conector DIN 43650 Tipo C.

- más moderna y funcional; la segunda, para incluir como mínimo una buena manija de sujeción para el conductor.
- » El ecoPT no incluye ningún tipo de mecanismo de suspensión. Para absorber las irregularidades del camino, solo dispone de la flexibilidad de las ruedas de goma. Si consideramos que el peso total es significativo (ecoPT más conductor), esto resulta en un andar bastante rústico y es entonces que la mayoría de las irregularidades del camino terminan siendo absorbidas por la espalda del conductor y, por lo tanto, la conducción por periodos prolongados (digamos mayor a dos o tres horas) puede ser bastante cansadora. El eventual agregado de algún tipo de suspensión no es algo simple de realizar y se debe analizar junto a otra opción: el uso de cubiertas sólidas a los efectos de evitar pinchaduras.
  - » Cuando decidí cambiar el método de dirección diferencial por el método de ruedas direccionales, realmente la geometría del ecoPT comenzó a parecerse más a la de un triciclo (¡aunque con ruedas tractoras en tándem en la parte delantera!) que a un vehículo clásico de cuatro ruedas. Además, este cambio trajo aparejada una ligera reducción (del orden del 10 %) en la distancia entre ejes. Estas modificaciones tuvieron como consecuencia que el ecoPT se comportara en forma algo más inestable en giros cerrados y en frenadas bruscas. Para compensar en parte esta situación, luego de varios ensayos con la tercera versión, decidí instalar dos ruedas giratorias auxiliares en las esquinas frontales. De todas maneras, esto se debe entender como un paliativo más que como una solución definitiva. Una posibilidad sería aumentar la distancia entre ejes (lo que



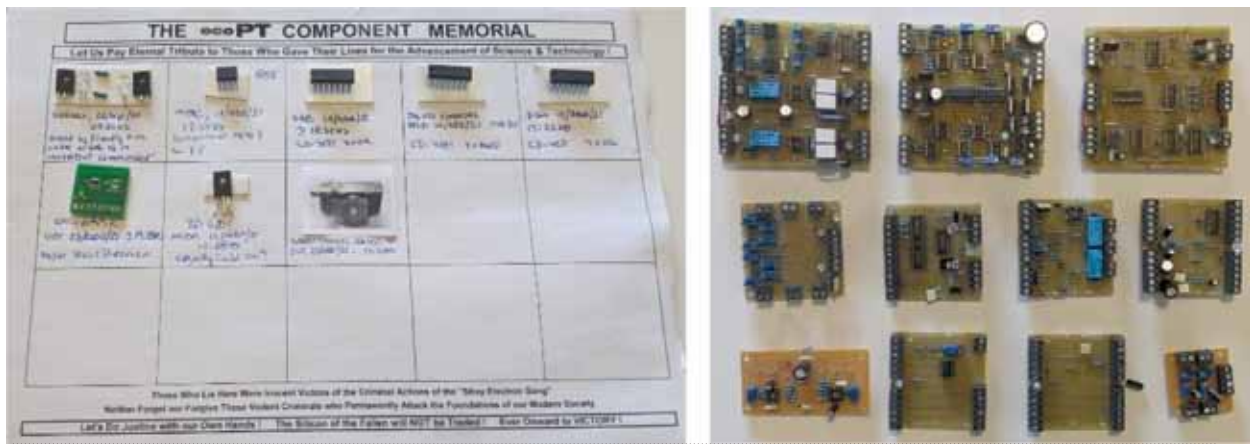


Figura 18. Detrás de escena. Izquierda: caídos en combate. Derecha: las rechazadas (placas diseñadas, construidas y ensayadas; y luego reemplazadas)

necesariamente significaría alargar las plataformas) y otra sería volver a un esquema de “base cuadrada” como el que empleé en la segunda versión, pero utilizando ruedas servodireccionales con una suerte de geometría Ackermann modificada.

- » Tanto las placas FSESC, como las fuentes switching, son bastante ruidosas desde un punto de vista eléctrico. Este efecto se hace notorio, por ejemplo, en el instante en que terminan de botarse las placas FSESC cada vez que se energizan. Actualmente, no existe ningún inconveniente derivado de estas características, pero seguramente debería ser un tema para estudiar en el futuro.
- » Se pueden imaginar buena cantidad de soluciones personalizadas a fin de que el ecoPT pueda cubrir diferentes necesidades. Por ejemplo, sería muy simple modificar la plataforma superior para generar un espacio de guardado. Otra posibilidad sería incluir algún tipo de “apoya cola” similar a los que se utilizan en algunas atracciones de Disney World.
- » Y por último, y de gran importancia, habría que estudiar el reemplazo de toda la electrónica convencional desarrollada por algún microcontrolador dedicado o, como mínimo,

por alguna plataforma computacional estándar (por ejemplo, Arduino o similar). Este cambio también debería implicar el uso de algún tipo de bus de comunicaciones (por ejemplo, CAN Bus) entre la unidad de control y el pórtico de comando. Obviamente, esta modificación también tendría que incluir a la función de BMS, para la cual se ha reservado el espacio físico, pero que no ha sido instalada. Un nuevo tipo de electrónica de control, también debería permitir diversificar las maniobras especiales de conducción (hasta ahora, solo se ha implementado el giro pivot) y el desarrollo de otras características como ser la función “Sígame”, que permita que el ecoPT siga a su dueño (¡como un perro obediente!) en lugares muy concurridos o en zonas en donde no está permitido utilizar un vehículo. El cambio de la plataforma de control sería muy relevante y seguramente tendría un costo de desarrollo significativo. A esto debe sumarse que es muy probable que los tiempos de realización sean algo impredecibles.

Al presente, fui yo quien condujo durante prácticamente todos los ensayos realizados. Si en algún momento se hicieran pruebas de conduc-

ción con terceros, seguramente aparecerían muchos problemas más. Pero, con los aquí listados es suficiente.

## Conclusiones

Como dije en el comienzo, el proyecto ecoPT nació a partir de una idea totalmente fortuita y sirvió de entretenimiento tecnológico durante la crisis mundial CoViD.

Es importante recalcar que al inicio de todo este proceso, tenía poco o nulo conocimiento acerca de vehículos eléctricos. Esto se hace bastante evidente analizando las decisiones de diseño erradas y los múltiples errores cometidos a lo largo del proyecto.

Pero este desarrollo también pone en evidencia el enorme poder de las fuentes públicas de información disponibles actualmente que ayudan a mitigar (en parte) la mencionada falta de conocimiento.

Todo este proyecto lo hice con recursos limitados, en particular en lo referido a espacio y equipamiento de trabajo. Esta realidad condicionó varias decisiones de diseño. De hecho, no podría ser calificado como "invento de garage" simplemente porque no hubo un garage disponible.

El ecoPT podría parecer cavernícola frente al despliegue técnico que hacen algunos vehículos eléctricos disponibles (sin ir muy lejos, se podría mencionar al segway), pero la realidad es que este desarrollo parece ser único en el mundo en, como mínimo, dos aspectos. El primero es que, gracias al panel solar, es 100% autosuficiente desde un punto de vista energético, en otras palabras, para funcionar nunca necesitaría conectarse a una fuente externa de energía.

Estimé que, si el ecoPT se utiliza diariamente en condiciones moderadas (por ejemplo, velocidad en el rango de 10 a 15 km/h, con un conductor de no más de 75 kg de peso y por superficies lla-

nas) durante un periodo de no más de una o dos horas, y que si, además, se lo mantiene bajo irradiación solar un mínimo de seis a ocho horas, la energía generada podría alcanzar con comodidad para compensar la energía consumida.

El segundo aspecto que haría del ecoPT único en el mundo es la combinación del concepto "Drive by Wire" con el hecho que posee tracción permanente en las cuatro ruedas, sumado a la capacidad de efectuar maniobras especiales que en el prototipo desarrollado están limitadas al giro pivot, pero que con el desarrollo de un sistema de control más sofisticado podrían estar solo limitadas por la imaginación.

Como dije, hice todo este desarrollo sin ningún objetivo comercial. No obstante, en caso de que en un futuro se pueda considerar el ecoPT para producción en serie, habría que optimizar fuertemente los costos, en particular el de algunas piezas complejas como son las que integran el conjunto de dirección.

Y para cerrar, un comentario totalmente mundano: si una persona pudiese llegar a pensar que circular en un ecoPT podría ser una buena situación para iniciar una conversación casual con una persona del otro sexo, mejor que lo piense dos veces, él o ella tendrían mejores posibilidades utilizando alguna alternativa mas convencional (como ser un Porsche, por ejemplo). ■