

NUEVAS ESTRUCTURAS PARA ESTIMACIÓN DE ESTADOS EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Fornaro Pedro, Puleston Paul, Battaiotto Pedro

Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales LEICI – UNLP-CONICET. 48 y 116 s/n, La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina.
e-mail: pedro.fornaro@ing.unlp.edu.ar

1- INTRODUCCIÓN

En la actualidad, lograr la transición energética no es posible si no se consideran sistemas de almacenamiento (SA). Estos son los encargados de lidiar con las fluctuaciones en la energía generada por fuentes renovables, tales como la solar, la eólica o la marina. En este contexto, es necesario considerar las problemáticas existentes en los SA más diversificados. Por ejemplo, baterías de Ión-Litio (BL), baterías de Flujo Redox (BFR), o Supercapacitores (SC). La fabricación de estos SA no es enteramente sustentable, por lo cual es necesario maximizar el rendimiento y la eficiencia en el uso de estos sistemas, para minimizar el impacto relacionado con el reciclaje y la extracción de materia prima. Para lograr esto, se requiere del estudio del comportamiento en tiempo real, de forma de garantizar una operación segura, confiable y eficiente. Convencionalmente, son empleados algoritmos de estimación de parámetros y estados, los cuales permiten caracterizar a través de un modelo predefinido, los estados de funcionamiento de los SA.

Los estados de funcionamiento más diversificados son los llamados estados de carga (EC) y de salud (ES). El primero de ellos permite conocer el nivel de carga de los SA, lo cual es fundamental para la regulación del funcionamiento de los convertidores electrónicos asociados, así como para diseñar algoritmos supervisores para la regulación del intercambio de energía. El segundo de ellos permite evaluar mediante la utilización de diferentes índices, el nivel de deterioro sufrido por el envejecimiento de los SA.

Existen numerosos inconvenientes para lograr el diseño de estimadores robustos y precisos, capaces de proveer todas las medidas requeridas para la determinación de los EC y ES. A pesar de esto, a partir del estudio de modelos lineales con parámetros variantes en el tiempo para estos sistemas, ha sido posible desarrollar una estructura basada en la combinación de algoritmos por modos deslizantes (MD) y estimadores convencionales (observar figura adjunta). Resultados preliminares han demostrado que la estructura desarrollada supera en velocidad de convergencia y precisión a los algoritmos tradicionalmente utilizados. Teniendo estos aspectos en consideración, en este trabajo son presentados los principales lineamientos requeridos para la comprensión de estos algoritmos, junto con algunos resultados ilustrativos de estimación para modelos electroquímicos de SA.

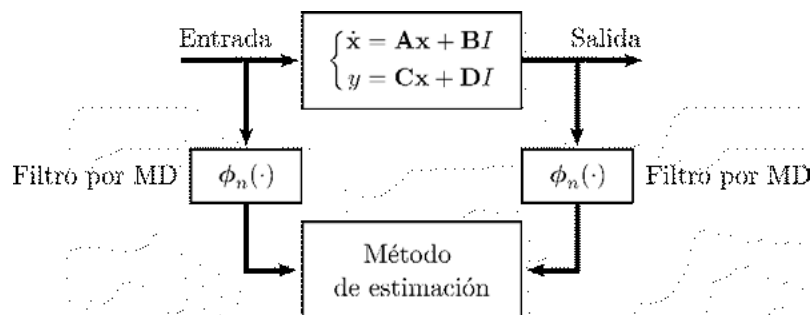


Figura 1. Esquema del método de estimación propuesto.

2- DESARROLLO

2.1 - Descripción alternativa en la forma canónica de M. Fliess.

El primer paso requerido para arribar a las nuevas estructuras para estimación de parámetros propuesta es el de encontrar una descripción cerrada para el comportamiento de los SA. Convencionalmente, con el objetivo de describir el comportamiento no lineal que relaciona la tensión de circuito abierto con la carga almacenada, son empleados modelos que incluyen tablas de lookup. Un ejemplo típico de esta relación no lineal para dos diferentes tecnologías de BL puede observarse en la Figura 2.

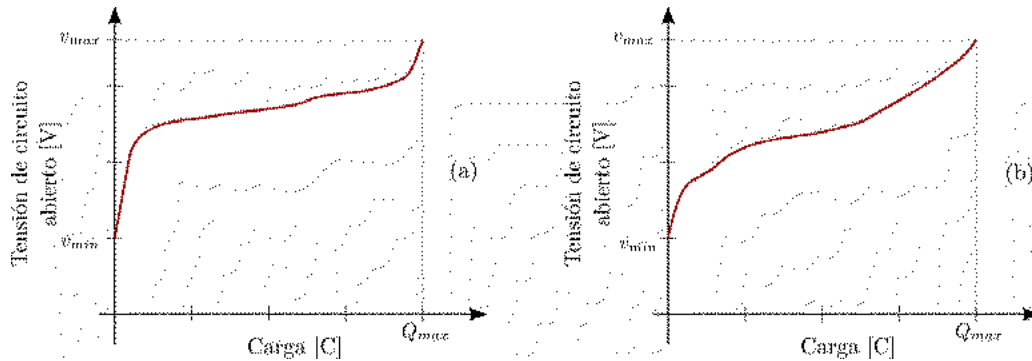


Figura 2. Tensión de circuito abierto vs carga en a) Electrodo de LMO/grafito; b) Electrodo de LNMCO/grafito.

Este comportamiento no es estático, sino que varía conforme el ES de los SA evoluciona. Por lo tanto, las tablas de lookup no podrían utilizarse para encontrar una descripción óptima de los SA estudiados.

Para lidiar con esta dificultad, y simultáneamente modelar las características no lineales de estos sistemas, es propuesta la inclusión de la llamada capacidad incremental (CI) en los modelos de circuito eléctrico (MCE) equivalentes. Un ejemplo para BL puede observarse en la Figura 3. En esta imagen, la capacidad es incluida como el elemento variable C_p .

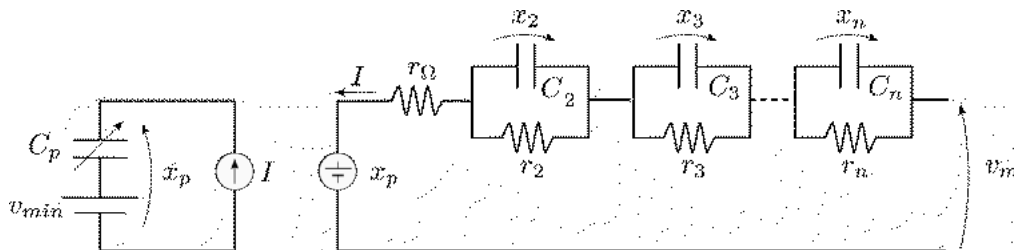


Figura 3. MCE para BL incluyendo a la CI.

Esto permite arribar a una descripción en el espacio de estados lineal variante en el tiempo, la cual puede emplearse para describir modelos de orden n de SA de energía, como es presentado a continuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = Ax + BI = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_2 r_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{C_n r_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_p} \\ \frac{1}{C_2} \\ \vdots \\ \frac{1}{C_n} \end{bmatrix} I \quad (1.a)$$

$$v_m = Cx + DI = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1] \begin{bmatrix} x_p \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + [r_\Omega] I \quad (1.b)$$

Donde los estados x son las tensiones de las sucesivas ramas RC del MCE utilizado. En particular, se destaca el estado x_p , el cual es la tensión de circuito abierto del SA.

De esta forma, utilizando esta descripción del sistema, es posible emplear todas las herramientas disponibles para sistemas lineales variantes en el tiempo. Sin embargo, vale la pena remarcar que, en los SA la CI varía conforme se almacena carga. Por lo tanto, para los valores de capacidad comerciales, en general la variación de carga almacenada es un proceso lento, y como resultado, el elemento C_p también varía lentamente.

Para este modelo lineal variante en el tiempo, es posible utilizar el esquema de observación adaptivo planteado en la Figura 1. Sucintamente, este es conformado a partir de describir el sistema en la Forma canónica generalizada de M. Fliess [1]. En esta descripción del espacio de estados, se realiza la transformación $v_m = z_1, v_m^{(n-1)} = z_n$, lo cual arroja:

$$\begin{aligned} v_m = z_1 &= Cx + DI \\ \dot{v}_m = z_2 &= CAx + BI + D\dot{I} \\ &\vdots \\ v_m^{(n-1)} = z_n &= CA^{n-1}x + CA^{n-2}BI + CA^{n-3}B\dot{I} + \dots + DI^{(n-1)} \end{aligned} \quad (2)$$

Lo cual puede reordenarse fácilmente llamando $\phi_{n-1}(f(t))$ al vector que contiene las sucesivas derivadas de $f(t)$ y entonces:

$$z = \phi_{n-1}(v_m) = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} D & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ CB & D & 0 & \dots & 0 & 0 \\ CAB & CB & D & 0 & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & D & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ CA^{n-2}B & CA^{n-3}B & CA^{n-4}B & \dots & CB & D \end{bmatrix} \phi_{n-1}(I(t)) \quad (3)$$

Con lo que queda definido el difeomorfismo de la transformación para los MCE de los SA bajo estudio. Se remarca que para que la transformación sea válida todos los parámetros del sistema deben ser lentamente variantes para casi todo t .

Utilizando este esquema, si se poseyeran en tiempo finito los vectores $\phi_{n-1}(v_m)$ y $\phi_{n-1}(I)$, entonces podría accederse también en tiempo finito a una estimación de los estados x del modelo del sistema de almacenamiento bajo estudio. Lograr esto, es posible mediante la utilización de algoritmos de diferenciación basados en modos deslizantes [2][3][4]. Como consecuencia, se ha presentado una nueva estructura de observación que, partiendo del cómputo de las derivadas de la entrada y salida del sistema, es capaz de proveer información en tiempo finito de los estados del MCE empleado.

2.2 - Salida parametrizada de los sistemas de almacenamiento

El uso de algoritmos de diferenciación por modos deslizantes para conformar observadores de estados posee una gran cantidad de ventajas por sobre otras estructuras de observación convencionales. En primer lugar, se destaca la ya mencionada convergencia en tiempo finito. En segundo lugar, estos algoritmos son capaces de rechazar contenido espurio incluido en las señales a diferenciar. Dependiendo del tipo de estructura de diferenciación empleada, estas características varían sutilmente.

A pesar de disponer con información del sistema en tiempo finito, debido a que en el difeomorfismo es incluida información de los parámetros del modelo del sistema, conocer los valores de las capacidades y resistencias que caracterizan al SA es esencial para que las estimaciones de los estados no posean errores. En otras palabras, es necesario conformar una estructura de observación adaptiva, capaz de actualizar en el observador los parámetros del modelo.

Lograr esto último en el esquema de observación planteado es trivial, puesto que la enésima derivada de la salida del sistema es la llamada *ecuación de error generalizada* [5]. Es decir

que es una ecuación la cual contiene las derivadas de la entrada, la salida, y todos los parámetros necesarios para caracterizar al sistema. Otra forma sencilla de acceder a esta misma información sería a través del cálculo de los coeficientes de los ceros y polos de la función de transferencia del sistema. Esta salida parametrizada puede ser escrita como:

$$v_m^n = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n \quad b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_n] \begin{bmatrix} v_m^{(n-1)} \\ v_m^{(n-2)} \\ \vdots \\ v_m \\ I^{(n)} \\ I^{(n-1)} \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} = \theta(t)\varphi^T(t) \quad (4)$$

Donde los coeficientes a_i y b_i son combinaciones algebraicas de los parámetros (resistencias y capacidades) del MCE.

Dicha salida parametrizada del sistema permite la utilización de un sinnúmero de algoritmos de estimación de parámetros, puesto que esta es *lineal en los parámetros del modelo*. Para ello debe tomarse en consideración la necesidad de contar con las derivadas de las corrientes y tensiones del sistema. Por ende, es esperable que el empleo de diferentes algoritmos de diferenciación brinde resultados levemente diferentes, como ha sido estudiado en [6]. Por otro lado, en lo que respecta a los algoritmos de estimación, entre los más destacados para este esquema se encuentran los basados en modos deslizantes, Filtros de Kalman-Bucy y algoritmos por mínimos cuadrados clásicos. Cada uno de estos métodos posee sus virtudes y desventajas, algunas de las cuales son en la actualidad, objeto de estudio del grupo de trabajo.

3- RESULTADOS Y DISCUSIONES

A modo de recapitulación, la estructura de observación adaptativa planteada permite la rápida estimación de estados y parámetros en SA. La velocidad del proceso de estimación depende por un lado de la velocidad de convergencia de los algoritmos de diferenciación, y por otro lado del nivel de persistencia de la excitación (PE) [7]. Este último, es un requerimiento clásico para garantizar la estabilidad y precisión de los métodos de estimación.

Utilizando la estructura propuesta, (para detalles de los algoritmos utilizados referirse a [2][6]) en esta sección se presentan algunos resultados de estimación preliminares. Estos se encuentran enfocados en la estimación de la CI, como herramienta para determinar el nivel de envejecimiento de BL, es decir, el ES de la misma. Adicionalmente, la CI podría ser empleada para mejorar la estimación del EC, pero esto es objeto de trabajos futuros.

Con el objetivo de validar el método de estimación propuesto, en esta sección se presentan los datos experimentales empleados. En [8] se dispone de un amplio conjunto de datos experimentales, a partir de los cuales es posible obtener las curvas características de BL con electrodos de LPF, las cuales son presentadas en la Figura 4.

Los datos provistos en [8], son relevamientos experimentales realizados para estudiar el envejecimiento de las BL: se realizaron sucesivos ciclos de carga y descarga, y se registraron las curvas presentadas cada 100 ciclos. En esta sección, es empleada información de los primeros 400 ciclos, con el objetivo de evaluar el desempeño de la estructura de estimación propuesta para obtener una medida del ES de la BL bajo estudio, a través de caracterizaciones de la CI. En este caso de estudio, se cuenta con la ventaja de poseer el valor exacto de capacidad de carga, así como de las curvas experimentales, por lo cual es factible realizar comparaciones precisas entre la capacidad del método para predecir la salud de las BL y los valores reales de deterioro.

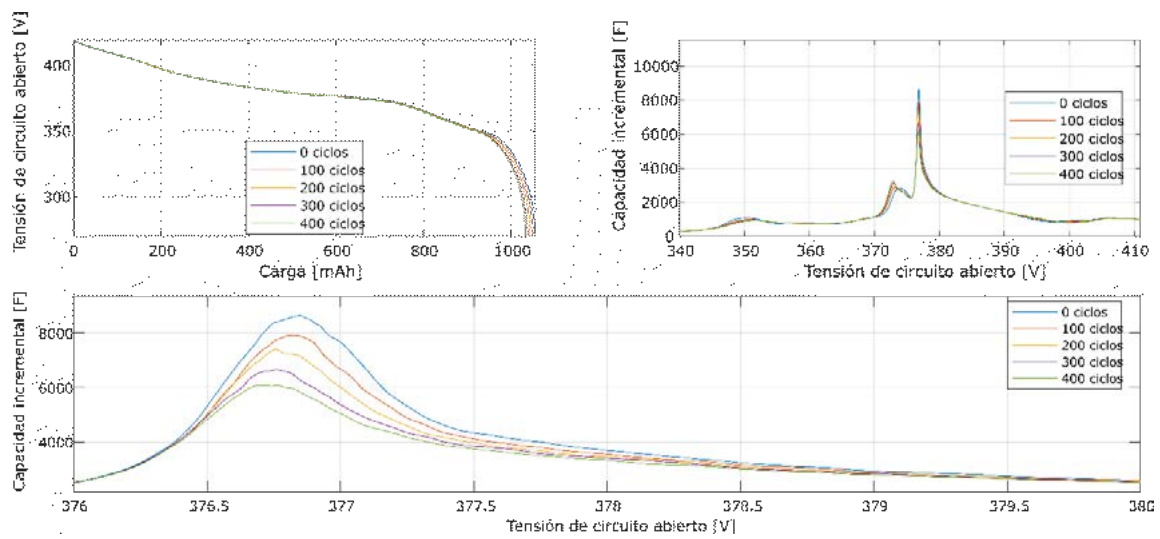


Figura 5. Curvas características de BL de LPF empleadas para evaluar el método de estimación.

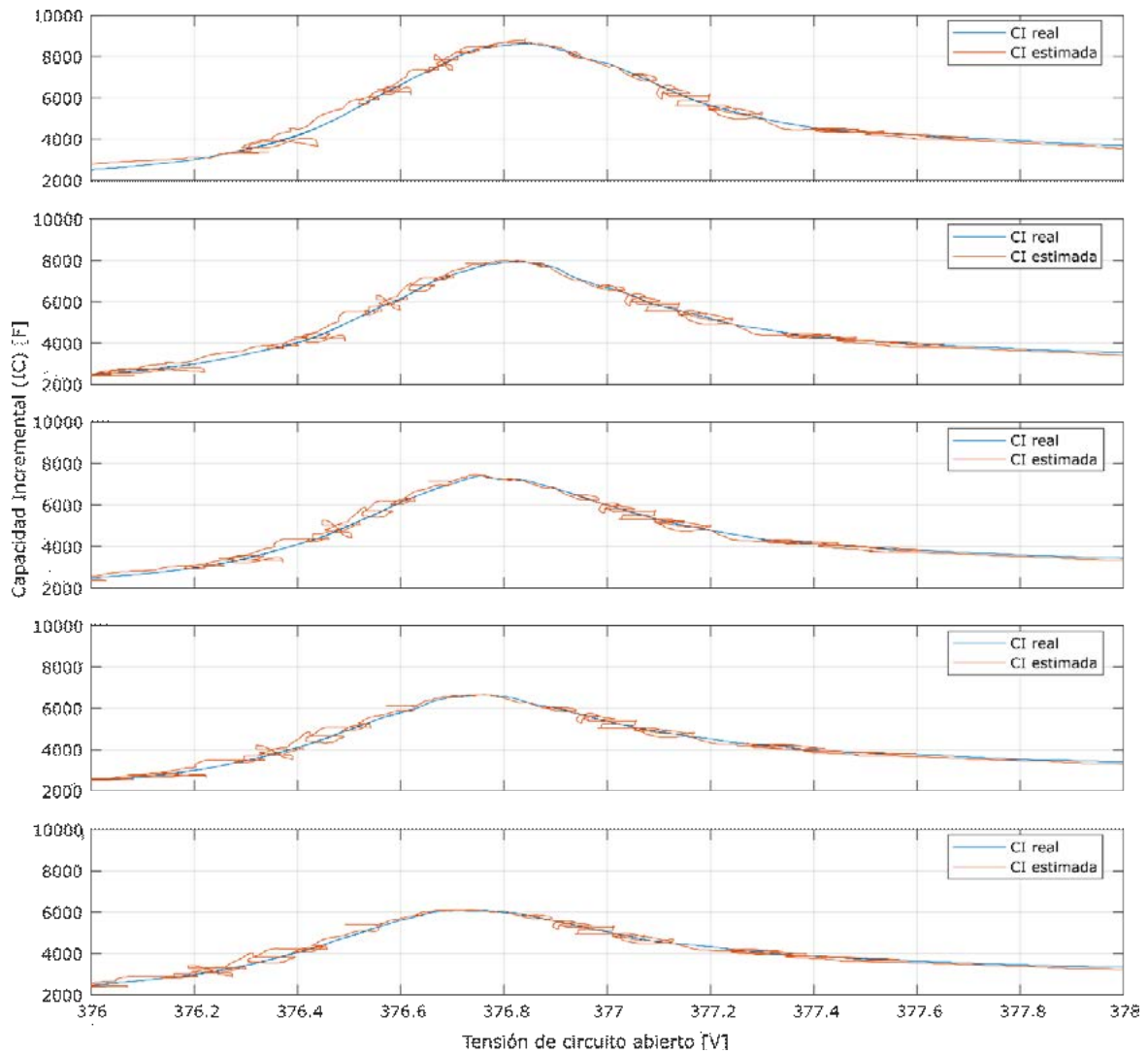


Figura 4. Resultados obtenidos de la estimación de la CI utilizando datos experimentales de [8].

En la Figura 5, pueden observarse las estimaciones de la CI para las BL con diferentes niveles de degradación. Luego, a partir de observar el valor máximo de la CI (pico en 376.75 V aprox.) es posible estimar la capacidad de carga del sistema. Los resultados de este procedimiento son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Listado de resultados obtenidos para la caracterización de una celda de BL deteriorada.

Número de ciclos	Pico de CI [F]	Estimación del pico de CI [F]	Capacidad [Ah]	Estimación de la capacidad [Ah]
0	8640	8700	7.3295	7.3333
100	7920	7950	7.2960	7.2905
200	7344	7400	7.2581	7.2594
300	6696	6650	7.2157	7.2170
400	6077	6100	7.1875	7.1859

Para arribar a los valores de la estimación de la capacidad de carga, debe notarse que existe una correlación entre la disminución del máximo valor del pico de la CI y la capacidad de almacenamiento. De esta forma es factible mediante una interpolación lineal, obtener los datos de la última columna de la Tabla 1, los cuales poseen un error inferior al 0.1%.

4- CONCLUSIONES

En este trabajo han sido presentados algunos desarrollos realizados para la caracterización de sistemas de almacenamiento de energía. Para esto ha sido presentado un modelo lineal variante en el tiempo, el cual permite modelar las no linealidades de los SA, y particularmente los efectos de la CI en BL. Luego ha sido presentado un esquema de observación adaptivo el cual puede emplearse para estimar estados y parámetros de los módulos bajo estudio. Para demostrar la aplicabilidad de los desarrollos realizados, han sido presentados los resultados obtenidos para llevar a cabo la estimación del ES de BL, por medio de la determinación del pico de la CI.

5- REFERENCIAS

- [1] M. Fliess, "Generalized controller canonical form for linear and nonlinear dynamics", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 35, no. 9, pp. 994–1001, 1990.
- [2] P. Fornaro, P. Puleston, P. Battaiotto, "On-line parameter estimation of a Lithium-Ion battery/supercapacitor storage system using FSMD", Journal of Energy Storage, Vol. 32, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101889.
- [3] A. Levant, "Robust exact filtering differentiators", European Journal of Control, Vol. 55, pp. 33–44, 2020, doi: 10.1016/j.ejcon.2019.08.006.
- [4] A. Levant, "Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control", Int. Journal of Control, Vol. 70, no. 9–10, pp. 924–941, doi: 10.1080/0020717031000099029.
- [5] P. M. Lion, "Rapid Identification of linear and nonlinear systems", AIAA journal, Vol. 5, no. 10, pp. 1835–1842, oct. 1967.
- [6] P. Fornaro, P. Puleston, P. Battaiotto, "Feasibility analysis of a class of high-order sliding-mode differentiators for redox flow batteries parameter estimation", 16th International Workshop on VSS, 2022, doi: 10.1109/VSS57184.2022.9901916.
- [7] K. S. Narendra, A. M. Annaswamy, "Persistent excitation in adaptive systems", Vol. 45, no. 1, pp 127–160, 1987, doi: 10.1080/00207178708933715.
- [8] Página del "Oxford University research archive", accedido el 7/3/23, <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:03ba4b01-cfed-46d3-9b1a-7d4a7bdf6fac>