

El problema oculto de la interacción: por qué los experimentos de un factor cada vez inducen a error

Juan Segurola

3Dresyns by Resyner Technologies S.L.

© 2026 Juan Segurola. Todos los derechos reservados.

Correspondencia: info@3Dresyns.com · www.3Dresyns.com

HEB-010 · Artículo técnico independiente · Versión v0.3

DOI: 10.5281/zenodo.22915242

Resumen

La experimentación de un factor cada vez pregunta como cambia una respuesta cuando una variable se modifica mientras las demás se mantienen fijas. Esa pregunta suele ser útil, pero puede ser estructuralmente incapaz de revelar interacciones: situaciones en las que el efecto de un factor depende del nivel de otro. En formulación, fotoquímica, procesado y ensayo de materiales, las interacciones pueden invertir tendencias aparentes, desplazar óptimos y hacer que un ajuste localmente satisfactorio falle al transferirse. Este artículo metodológico desarrolla el problema oculto de la interacción y explica por que los diseños factoriales, de superficie de respuesta y de mezclas responden preguntas diferentes de la exploración secuencial de un factor cada vez. La proposición central es que una interacción no es ruido ni una complicación estadística; es información sobre como se comporta el sistema cuando las variables actúan conjuntamente.

Palabras clave: interacción; diseño factorial; un factor cada vez; DOE; superficie de respuesta; diseño de mezclas; confounding; optimización

1. Propósito y límite de evidencia

HEB-001 introdujo el diseño factorial y de mezclas y los límites de OFAT [1]. HEB-010 aísla el problema de razonamiento. No define una receta universal de DOE. El diseño debe corresponder a la geometría de los factores, la capacidad de medición y el propósito científico.

2. La pregunta OFAT es condicional

Cambiar el factor A mientras B se mantiene fijo estima el efecto de A en ese nivel elegido de B. No demuestra que el mismo efecto exista en otro nivel de B. La afirmación experimental es, por tanto, condicional incluso cuando se informa como una tendencia general.

3. Interacción significa que los efectos dependen del contexto

En un modelo sencillo de dos factores, un término AB representa interacción. Un efecto principal positivo de A puede coexistir con un efecto negativo de A en parte del intervalo de B. La noción de un único «efecto de A» queda entonces incompleta salvo que se especifique el estado de B.

4. La optimización secuencial puede encerrar el experimento en una trayectoria equivocada

Un flujo OFAT suele elegir un nivel preferido de A, fijarlo y después optimizar B. Si el mejor B depende de A, la primera elección restringe lo que puede descubrir la segunda etapa. El ajuste final puede ser razonable localmente y, sin embargo, ser globalmente pobre dentro de la región investigada.

5. Los diseños factoriales exponen efectos de combinación

Un diseño factorial muestrea deliberadamente combinaciones para que puedan estimarse efectos principales e interacciones dentro de los supuestos del diseño. La comparación de Czitrom entre OFAT y experimentos diseñados, citada en HEB-001, ilustra esta ventaja estructural [2,3]. El diseño factorial no garantiza una respuesta útil; solo hace estimables determinadas preguntas de interacción [3].

6. La curvatura requiere más que una comparación a dos niveles

Cuando la respuesta es curva, dos niveles por factor no permiten identificar términos cuadráticos puros. Los puntos centrales pueden revelar curvatura; los diseños de superficie de respuesta de segundo orden pueden mapearla. La optimización debe seguir a la evidencia de que el modelo ajustado representa adecuadamente la región, en lugar de asumir linealidad porque solo se midieron contrastes lineales.

7. Las variables de mezcla viven en un espacio restringido

Las proporciones de una formulación satisfacen una restricción de suma. Aumentar un componente obliga a disminuir uno o más de los otros, por lo que falló la intuición convencional de factores independientes. El ejemplo de mezcla de fotoiniciadores de HEB-001 utilizó diseño de mezclas para equilibrar reactividad y estabilidad porque los componentes interactuaban en un espacio de composición restringido [1,4].

8. La interacción puede ser física, química o procedimental

La temperatura puede modificar simultáneamente la viscosidad y la cinética de reacción; la exposición puede alterar tanto la conversión como el estado térmico; el tiempo de lavado puede interactuar con la geometría a través de la distancia de difusión; la técnica del operador puede interactuar con el diseño de la fijación. La interacción estadística es un patrón de respuesta, no una prueba de un único mecanismo microscópico. La atribución mecanística requiere evidencia adicional.

9. El confounding puede imitar una interacción u ocultarla

El orden de ejecución, el lote, el día o la posición pueden alinearse con combinaciones de factores y distorsionar los efectos estimados. La aleatorización, el bloqueo y la replicación protegen el diseño, pero no rescatan una medición de respuesta inválida. El método de medición debe estar cualificado antes de que la sofisticación estadística sea informativa.

10. Disciplina práctica de diseño

Empiece por la pregunta causal, no por el menú del software. Identifique los factores que probablemente actúen conjuntamente, defina intervalos factibles, distinga factores de proceso de proporciones de mezcla, especifique la unidad experimental, incluya replicación al nivel relevante y predefina como se juzgará la adecuación del modelo. Utilice OFAT deliberadamente para cribado solo cuando el riesgo de interacción sea aceptablemente bajo o cuando la afirmación sea explícitamente local.

11. Una interacción sencilla puede invertir el efecto aparente

Consideremos una respuesta medida a dos temperaturas y dos concentraciones. A baja temperatura, aumentar la concentración puede elevar la respuesta; a alta temperatura, el mismo aumento puede reducirla. Promediar entre temperaturas podría mostrar poco efecto global de concentración aunque la concentración importe mucho a ambas temperaturas. Alternativamente, un experimento OFAT realizado solo a baja temperatura podría concluir que una concentración mayor es beneficiosa y transferir esa regla al régimen de alta temperatura, donde falló. Este es el significado práctico de la interacción: la dirección o magnitud de un efecto está condicionada por otra variable. Una única afirmación de efecto principal comprime esa estructura condicional.

12. Los términos de interacción no identifican automáticamente el mecanismo

Una interacción estadísticamente significativa indica que el patrón de respuesta no es aditivo en la escala elegida. No revela por sí sola por qué. Temperatura y concentración pueden interactuar por viscosidad, transporte de oxígeno, cinética radicalaria, solubilidad, estado de fase u otra variable correlacionada. La interpretación mecanística requiere mediciones o perturbaciones dirigidas. Esta distinción evita convertir el DOE en un oráculo mecanístico: los experimentos diseñados revelan estructura en la superficie de respuesta; se necesita ciencia adicional para asignar la causa física.

13. El riesgo de interacción debe conformar la estrategia de cribado

No todos los estudios requieren un gran diseño factorial. El cribado inicial puede utilizar legítimamente cambios simples de un factor cuando el objetivo es exploratorio y los recursos son limitados. El requisito metodológico es mantener local la inferencia. Si un factor se criba bajo una única condición de fondo, el resultado debe formularse como condicional hasta que se haya desafiado la interacción. Los factores sospechosos de acoplamiento fuerte deben muestrearse conjuntamente desde una fase temprana, porque un cribado OFAT puede eliminar de otro modo un componente que habría sido valioso en combinación. Diseño eficiente significa ajustar la complejidad a la pregunta, no maximizar el número de términos del modelo.

14. Las respuestas competidoras crean un segundo problema de compromiso

Un ajuste experimental puede mejorar una respuesta y empeorar otra. Un cambio de formulación puede acelerar el curado y reducir la estabilidad de almacenamiento; una condición de postcurado puede aumentar el módulo y aumentar la distorsión; una condición de limpieza puede eliminar residuo más rápidamente y aumentar el

hinchamiento. Optimizar una respuesta de forma secuencial puede crear, por tanto, una falsa sensación de progreso. El diseño multirrespuesta requiere declarar objetivos y compromisos antes de elegir el ajuste final. La región útil puede ser un compromiso tipo Pareto en lugar del punto que maximiza una única métrica. Esto extiende el problema de interacción más allá de términos factor-factor: las propias decisiones experimentales interactúan a través de resultados competidores. El estudio de diseño de mezclas del autor de 1999 proporciona un ejemplo primario de este compromiso reactividad-estabilidad [5]. HEB-013 trata por separado que puede afirmar un óptimo ajustado.

15. Los diseños dispersos siguen requiriendo juicio científico

Los espacios experimentales grandes invitan a una reducción agresiva mediante diseños fraccionarios o matrices de cribado. Pueden ser potentes cuando es plausible que las interacciones de orden superior sean despreciables o cuando se comprende la estructura de alias. Pero el supuesto de esparsidad es un supuesto científico, no un hecho estadístico. Si una interacción supuestamente despreciable contiene el mecanismo de interés, el diseño reducido puede ocultarla por construcción. La experimentación eficiente requiere, por tanto, una jerarquía defendible de interacciones probables, seguida de confirmación en la región donde se utilizará el modelo provisional. El objetivo no es estimar todos los términos posibles; es evitar que el diseño sea estructuralmente ciego a las combinaciones que podrían cambiar la conclusión.

16. Conclusiones

OFAT no es incorrecto; responde una pregunta más estrecha de la que a menudo se le pide sustentar. Cuando las variables interactúan, las tendencias aisladas no se transfieren automáticamente por todo el espacio experimental. Los experimentos diseñados exponen efectos de combinación, pero siguen dependiendo de una medición válida, replicación adecuada y comprobación del modelo. El problema oculto de la interacción se resuelve tratando el contexto como parte del efecto.

Referencias

- [1] Seguro, J. The Hidden Error Budget: Measurement-System Failure, False Precision and Experimental Design in Laboratory Science. HEB-001. 3Dresyns Independent Technical Articles (2026). DOI: 10.5281/zenodo.22862642.
- [2] Czitrom, V. One-Factor-at-a-Time versus Designed Experiments. The American Statistician 53(2) (1999) 126-131. DOI: 10.1080/00031305.1999.10474445.
- [3] Heckert, N. A.; Filliben, J. J.; Croarkin, C. M.; Hembree, B.; Guthrie, W. F.; Tobias, P.; Prinz, J. Handbook 151: NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. National Institute of Standards and Technology, 2002.
- [4] Cornell, J. A. Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data, 3rd ed. Wiley, 2002. DOI: 10.1002/9781118204221.
- [5] Seguro, J.; Allen, N. S.; Edge, M.; McMahon, A. Design of eutectic photoinitiator blends for UV/visible curable acrylated printing inks and coatings. Progress in Organic Coatings 37(1-2) (1999) 23-37. DOI: 10.1016/S0300-9440(99)00052-1.

Limite de conocimiento

HEB-010 trata el problema inferencial creado cuando el diseño experimental no puede estimar interacciones. La geometría de diseño de mezclas y la optimización de formulaciones de fotoiniciadores se ilustran mediante el estudio primario citado [5]; la adecuación del modelo y la interpretación del óptimo pertenecen a HEB-013. La cualificación de ingeniería específica de aplicación permanece en los Engineering Reviews pertinentes.

Limitaciones

Este artículo metodológico es una síntesis acotada de los corpus controlados HEB y Engineering Review. No informa de un nuevo conjunto de datos experimental, no establece umbrales numéricos universales y no convierte ejemplos de un dominio en especificaciones aplicables a todas las aplicaciones. Las afirmaciones que requieren cualificación específica de aplicación permanecen en la revisión técnica o estudio primario correspondiente.