



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



CIIIM

CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN MULTIDISCIPLINARIA

CIIIM 2025

<http://orizaba.tecnm.mx/ciiim>

Memorias de congreso publicadas por el
TecNM - Tecnológico Nacional de México
ITO - Instituto Tecnológico de Orizaba
DEPI - División de Estudios de Posgrado

Ingeniería Química
Ingeniería Industrial
Sistemas Computacionales
Ingeniería Administrativa
Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Investigación Educativa



El TecNM/Instituto Tecnológico de Orizaba a través de la División de Estudios de Posgrado e Investigación invita a la comunidad académica, científica, profesional y estudiantil a someter manuscritos de trabajos de investigación originales en la Revista Internacional de Investigación Multidisciplinaria.

OBJETIVO DEL CIIIM

Difundir los avances en la producción científica y tecnológica en el campo de la Ingeniería originales con la finalidad de promover, generar y desarrollar el conocimiento entre las distintas disciplinas que comprenden a este campo de estudio.

COMITÉ EDITORIAL

Dra. Ofelia Landeta Escamilla
Responsable Institucional

depi_orizaba@tecnm.mx

Dr. Eduardo Mael Sánchez Coronado
Responsable general

cim.responsable.general@ito-depi.edu.mx

Dr. Fernando Ortiz Flores
Responsable técnico

cim.responsable.tecnico@ito-depi.edu.mx

Dra. Araceli Ortiz Celiseo
Responsable de Ing. Química

cim.quimica@ito-depi.edu.mx

Dr. Víctor Ricardo Castillo Intriago
Responsable de Ing. Administrativa

cim.administrativa@ito-depi.edu.mx

Dra. Ma. Eloísa Gurruchaga Rodríguez
Responsable de Ing. Industrial

cim.industrial@ito-depi.edu.mx

MSC. Luis Angel Reyes
Responsable de Sistemas Comp.

cim.sistemas.computacionales@ito-depi.edu.mx

Dr. Ma. Guadalupe Balderrábano Saucedo
Responsable de Investigación Educativa

cim.educativa@ito-depi.edu.mx

Dr. Ignacio Herrera Aguilar
Responsable de Ing. Mecánica y Mecatrónica

cim.mecatronica@ito-depi.edu.mx

Dr. Gerardo Águila Rodríguez
Responsable de Ing. Eléctrica y Electrónica

cim.electronica@ito-depi.edu.mx

MC. E. Alejandro Cuellar Cortes
Responsable de plataforma

ecuellar@ito-depi.edu.mx

Dr. Guillermo Arriola Carrera
Editor

guillermo.ac@orizaba.tecnm.mx

Dr. Erik Samuel Rosas Mendoza
Facturación

factura.cim.ito@gmail.com



Evaluación de una Celda de Hidrógeno Verde de Flujo Alcalina En Condiciones Controladas y Reales

**Ayala-Bautista, Alan Gabriel^{††}; Bonilla-Corpus, Willow; Ochoa-López,
Issis¹; Ramos-Pérez, Mario Alonso¹**

¹CETYS Universidad, Campus Mexicali
Calzada Cetys s/n Col. Rivera
Mexicali, Baja California, México, 21259
^{††}alan.ayala@cetys.mx
Ingeniería Química, Energías Alternativas

RESUMEN

Este estudio presenta el diseño y la caracterización de una celda de hidrógeno verde de flujo alcalina, integrando mejoras en eficiencia, seguridad y adaptabilidad energética. El sistema incorpora un circuito eléctrico acoplado a un arreglo fotovoltaico, optimizando la distribución de corriente durante el proceso de electrólisis. Se logró una reducción significativa en la concentración de NaOH sin comprometer la producción de hidrógeno. Además, se desarrolló un sistema de flujo personalizado para minimizar la resistencia eléctrica interna, mejorando así el rendimiento electroquímico. La celda utiliza un sistema fotovoltaico ajustado según la irradiancia solar local, el área del panel y la eficiencia de conversión. Con análisis estadísticos, se confirma la viabilidad del sistema y se abren oportunidades en proyectos de transición futuros.

Abstract

This study presents the design and characterization of an alkaline hydrogen flow cell, developed to improve efficiency, safety, and energy adaptability. The system integrates an electric circuit with a photovoltaic array to optimize current distribution during electrolysis. A significant reduction in NaOH concentration was achieved without compromising hydrogen production, enhancing operational safety, and reducing costs. A custom flow system was implemented to minimize internal resistance and improve electrochemical performance. The cell was calibrated under local solar irradiance levels, panel surface area, and conversion efficiencies. The results confirm the system's technical viability and highlight its potential for deployment in energy transition initiatives.

Palabras clave: *Diseño de Experimentos; Electrólisis Alcalina; Hidrógeno Verde*

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia del hidrógeno como energía alterna

La creciente tendencia por alcanzar la neutralidad de emisiones de carbono representa un desafío global debido a la dependencia actual de combustibles fósiles donde el 81% del consumo energético mundial en el año 2024 fue en base a hidrocarburos [1].

La producción de hidrógeno representa una alternativa limpia y eficiente para el uso de combustibles fósiles, y reducir significativamente el impacto medioambiental de estas tecnologías. Asumiendo un incremento de la temperatura mundial de 1.5°C para el año 2050, se prevé que el hidrógeno limpio reduzca en un 12% el total de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Para lograr este objetivo, sería necesario aumentar la producción global de hidrógeno por un factor de cinco. Habiendo 95 Mton/año en 2022 y siendo 523 Mton/año necesarias para el 2050 [2].

Los vehículos eléctricos de celdas de combustible de hidrógeno (HFCEVs) muestran un futuro sostenible y libre de emisiones para el transporte limpio y eficiente. Las celdas de hidrógeno verde proyectan un panorama optimista para la sustentabilidad en sectores de electromovilidad, producción energética, y procesos industriales y domésticos. [3, 4]

1.2 Producción de Hidrógeno

Alrededor del 95% de la producción global de hidrógeno proviene de combustibles fósiles. El principal entre estos es el hidrógeno gris, que se obtiene mediante el reformado de vapor de gas natural o la gasificación de carbón. A pesar de su amplio uso actual, este tipo de hidrógeno, genera aproximadamente 830 millones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono al año [5].

Existen otras variantes derivadas de fuentes fósiles, como el hidrógeno azul, producido por reformado de metano con vapor y el hidrógeno turquesa, por pirólisis.

En contraste, los métodos limpios incluyen el hidrógeno verde, producido por electrólisis de agua, utilizando energía eléctrica proveniente de fuentes renovables. Por otra parte, los sistemas de electrólisis que usan energía proveniente de plantas nucleares se identifican con el color púrpura o rosa, dependiendo del marco regulatorio. Finalmente el hidrógeno amarillo, el cual se produce a partir de electrólisis empleando energía de la red eléctrica de cada región [6].

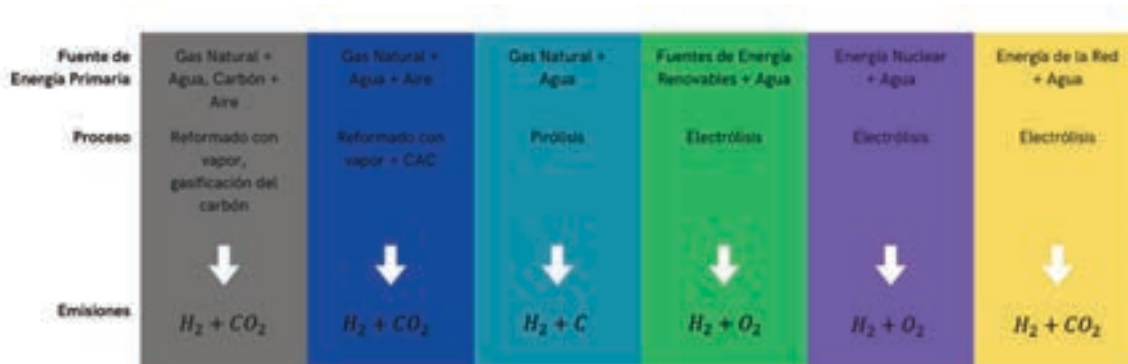


Figura 1. Diferentes métodos de producción de hidrógeno y su clasificación por colores

1.3 Electrólisis alcalina en celdas de flujo

La electrólisis se destaca como el método más empleado para la producción de hidrógeno verde, donde su eficiencia depende de la construcción de la celda electrolítica.

Algunas de sus principales limitaciones son que, por su naturaleza electroquímica, depende de un suministro constante de energía eléctrica para llevarse a cabo su ejecución [7].

La producción mediante electrólisis requiere de la construcción de una celda electroquímica, entre las distintas variantes, ésta se destaca por costos de inversión bajos y una larga vida del sistema. Estas celdas consisten en introducir el agua al cátodo, donde se produce el hidrógeno (H_2). Al mismo tiempo, los iones hidróxido (OH^-) viajan a través del electrolito hacia el ánodo para formar oxígeno (O_2).

La electrólisis alcalina tiene diversas aplicaciones, principalmente en la producción de hidrógeno, aunque también se usa en la obtención de metales y en procesos industriales. Se destaca como una vía para producir hidrógeno verde, utilizado como fuente de energía renovable.

1.4 Hidrógeno verde

En la actualidad, existen estrategias que implementan procesos más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, el hidrógeno verde es una de ellas. Para este tipo de producción, se emplean principalmente, tres tecnologías: la electrólisis de agua alcalina, la electrólisis con membrana de intercambio protónico (PEM, por sus siglas en inglés) y la celda electrolizadora de óxido sólido (SOEC, por sus siglas en inglés) [8].

El hidrógeno verde puede ser integrado en sistemas de cogeneración para producir simultáneamente electricidad y calor, mejorando la eficiencia energética y reduciendo las emisiones en comparación con los combustibles fósiles. En la figura 2, se describe la construcción de la celda de hidrógeno verde propuesta por los autores de esta contribución.

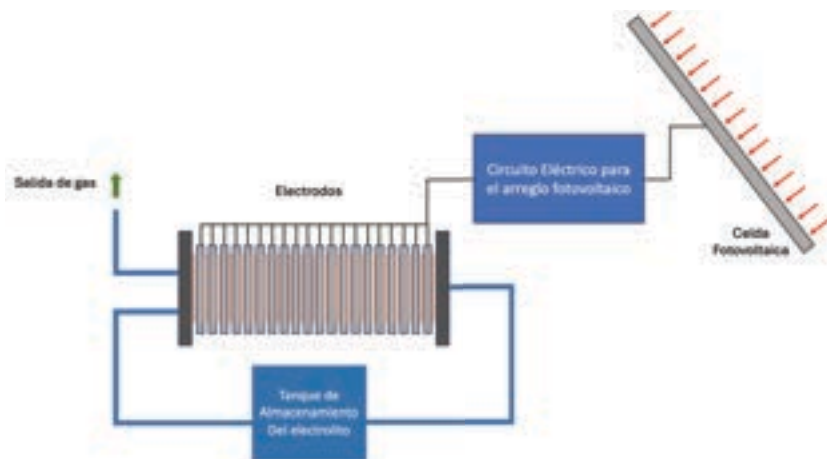


Figura 2. Construcción de una celda de hidrógeno verde de flujo con los componentes importantes para su estudio.

2. METODOLOGÍA

La celda de electrólisis alcalina fue construida utilizando electrodos de acero inoxidable con geometría rectangular ranurada. Esta forma favorece el intercambio de cargas y permite el paso del electrolito dentro del arreglo de electrodos, colocados para alternar la polaridad suministrada por la fuente conmutada, siendo la mitad de los electrodos con



carga positiva y el resto con carga negativa. Se integraron paredes de acrílico, empaques de neopreno para evitar fugas al paso de los electrodos y una bomba de 12 V para presurizar el electrolito, mismo que se almacenó en un tanque de plástico para su transporte y recirculación; una descripción gráfica se puede encontrar en la figura 2.

En el estudio de la caracterización de la celda de hidrógeno planteada se diseñó un arreglo fotovoltaico de baja potencia donde se probó el efecto de la resistencia eléctrica del circuito de alimentación y de la concentración de la solución electrolítica en la corriente final dentro de la celda, con el objetivo de encontrar el arreglo óptimo evaluando los dos parámetros. Dentro de la alimentación, se adecuó un sistema fotovoltaico empleando un módulo *JA Solar* de 260 W de potencia nominal, un inversor marca *Wyndynation* modelo *VertaMax* de 1000 W, un controlador de cargas marca *Renogy* modelo *Rover* de 20 A junto con un sistema de almacenamiento de una batería marca *Renogy* modelo *RNG – BATT – GEL12-100* y una fuente de alimentación conmutada de 300 W. Dentro del dimensionamiento de la potencia, se adecuó un circuito para manipular el amperaje proveniente del arreglo fotovoltaico que se suministra a los electrodos, modificando 4 niveles de configuraciones internas para evaluar la corriente de alimentación. Por otro lado, es conocido el efecto de la concentración del electrolito en la electrolisis, por lo que se varió teniendo 4 niveles de hidróxido de sodio (NaOH) de concentración 0.5, 1, 2 y 3 mol L⁻¹.

Se planteó un diseño factorial completo, evaluando los niveles y sus interacciones en dos condiciones, en ambiente controlado y en exposición directa solar para minimizar el uso de electrolito y maximizar la corriente eléctrica que entra a la celda electrolizadora. Los experimentos fueron realizados en días soleados sin sombreado en horas de sol pico en la ciudad de Mexicali, teniendo ángulo de incidencia máximo acorde a análisis de geometría solar locales, el ángulo de hora y de inclinación del panel solar eran adecuados para tener una corriente estable durante la fase experimental. La celda de hidrógeno se mantuvo bajo sombra, con una temperatura ambiente de 30° C.

Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con un nivel de significancia de 5%, validando cuál tiene mayor influencia estadística a la hora de estudiar estos dos parámetros. En cada uno de los experimentos se tomaron los datos con un equipo *IntegraVision PowerAnalyzer* modelo *PA2203A* de *Keysight* donde las mediciones se estandarizaban a partir de la medición número 300 y se tomaban las medias estadísticas para cada una de las variables estudiadas.

3. RESULTADOS

Los valores medidos de los experimentos se presentan en las tablas en la figura 3, donde se muestran los diferentes parámetros dependiendo de la condición de operación. Es importante discutir el efecto de cada factor estudiado y su relevancia estadística,

demostrando si tiene o no efectos significativos en las variables de respuesta para las dos condiciones.

a)	NaOH (mol L ⁻¹)	Corriente a condiciones controladas (A)			
		Arreglo 1	Arreglo 2	Arreglo 3	Arreglo 4
	3	10.97	15.56	18.03	23.1
	2	11.772	15.831	18.95	23.188
	1	10.99	15.644	18.8	23.127
	0.5	11.772	15.793	18.552	21.897

b)	NaOH (mol L ⁻¹)	Corriente a condiciones fotovoltaicas (A)			
		Arreglo 1	Arreglo 2	Arreglo 3	Arreglo 4
	3	11.74	16.729	19.369	22.732
	2	11.489	16.353	19.228	22.49
	1	11.43	16.2	18.8	22.274
	0.5	11.236	15.94	18.5	22.283

c)	NaOH (mol L ⁻¹)	Potencia total a condiciones controladas (W)			
		Arreglo 1	Arreglo 2	Arreglo 3	Arreglo 4
	3	55	78	90	116
	2	56.498	79.975	95.981	117.21
	1	55.389	79	95	116.88
	0.5	56.279	79.877	93.871	110.9

d)	NaOH (mol L ⁻¹)	Potencia total a condiciones fotovoltaicas (W)			
		Arreglo 1	Arreglo 2	Arreglo 3	Arreglo 4
	3	58.781	83.433	96	113
	2	57	81.58	96	112
	1	56.896	81	94	111
	0.5	56.811	80.448	93	112.44

Figura 3. Resultados del diseño factorial completo con las variables de respuesta correspondientes. Las tablas a) y b) son para la corriente total en la celda mientras que la c) y d) son para la potencia total en la celda en las condiciones controladas y fotovoltaicas.

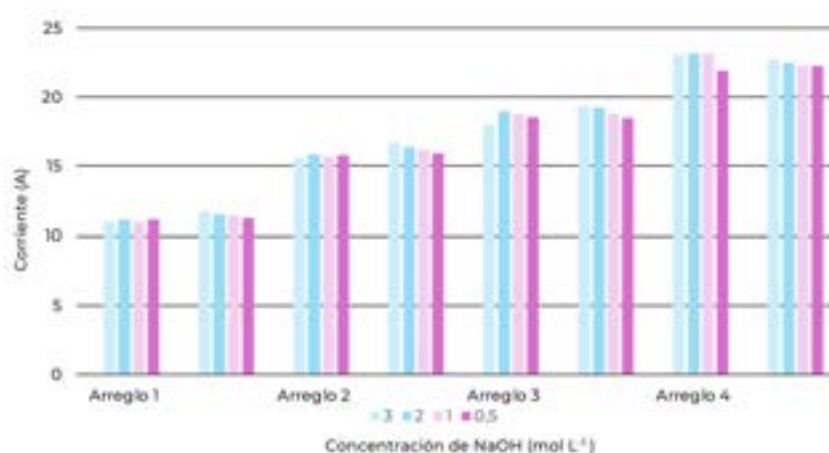


Figura 4. Gráfica de barras donde se visualiza el comportamiento de la corriente de la celda dependiendo del arreglo del circuito y la concentración del electrolito. Del lado izquierdo es a condiciones controladas y del derecho condiciones fotovoltaicas.

En la figura 3 se pueden apreciar los valores de la corriente total; los resultados de la ANOVA de dos factores muestran que en condiciones controladas, los arreglos de resistencias dentro del circuito eran altamente significativos ($F = 701.61 > F_{crit} = 3.86$) mientras que la concentración del electrolito no ($F = 1.15 < F_{crit} = 3.86$), en comparación con condiciones ambientales donde se mostró que los dos factores tienen relevancia ($F = 23.799 > F_{crit} = 3.86$ para la concentración del electrolito y $F = 6418.513 > F_{crit} = 3.86$ para los arreglos de resistencias).

Por otro lado, estudiando la potencia se puede observar el mismo comportamiento para los dos casos de condiciones. Los resultados nos dan un panorama interesante de estudio y optimización, resaltando que el principal efecto de variación es el arreglo de resistencias dentro del circuito fotovoltaico. También cabe mencionar que otros investigadores emplean concentraciones altas de electrolito en celdas de electrólisis estacionarias [6],



este problema se puede mitigar con un sistema de flujo continuo con un tanque de almacenamiento para el electrolito; utilizando una concentración baja y eliminando costos por reactivos.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

La variación del efecto de la concentración en condiciones de control y reales nos muestra que si existe una diferencia operativa entre las dos situaciones. Dentro de las hipótesis formuladas por los autores de este trabajo resaltamos el efecto de la temperatura de operación cuando se analiza la celda electrolítica, mismo que corresponde a un trabajo futuro, siendo el estudio de su efecto en el pH y la temperatura en las mismas condiciones debido a que la experimentación bajo el sol provoca calentamiento de la solución electrolítica y su efecto en la corriente es algo que otros investigadores también reportan en sus hallazgos [9]. Además, el efecto de la temperatura ambiente y de la irradiación del sol es un caso particular porque se busca que la celda opere en sombra mientras que el arreglo fotovoltaico sea quien tenga suministro de radiación solar, lo cual presenta un reto técnico a la hora de operación de la celda.

El trabajo realizado permitió avanzar en el diseño y caracterización de una celda de hidrógeno verde de flujo alcalina, integrando múltiples innovaciones orientadas a mejorar su eficiencia y adaptabilidad energética. Se optimizó el arreglo del circuito eléctrico, reduciendo pérdidas por contacto y mejorando la distribución de corriente en el sistema de electrólisis. Paralelamente, se logró minimizar la concentración de NaOH como electrolito sin comprometer la producción de hidrógeno, comparado con lo que emplean otros investigadores que rondan entre el 20% al 30% [10] en peso del electrolito, lo que representa una reducción significativa de reactivos y una migración más adecuada a un proceso más sostenible. Una de las contribuciones más relevantes fue el diseño de un electrodo novedoso, cuya geometría ranurada favorece la eficiencia electroquímica y la durabilidad en condiciones alcalinas.

Además, la implementación de un sistema de flujo permitió disminuir la resistencia eléctrica interna del electrolito, mejorando la transferencia de masa, mismo efecto validado con los estudios estadísticos. Se demostró que la celda puede ser alimentada eficientemente por un sistema fotovoltaico, el cual fue diseñado específicamente para satisfacer los requerimientos energéticos de la celda donde se consideraron factores como la irradiancia local y la eficiencia de conversión. Además, a futuro se pretende estudiar la variación de la corriente eléctrica por los efectos de la temperatura y uso continuo, haciendo mayor caracterización en cada parámetro que puede involucrar la eficiencia de la celda. Esta integración entre generación solar y producción de hidrógeno refuerza el potencial del sistema como solución descentralizada para aplicaciones energéticas limpias. En conjunto, los resultados obtenidos validan la viabilidad técnica de una celda de hidrógeno verde de flujo alcalina optimizada, y abren nuevas posibilidades para su implementación en escenarios reales, tanto en contextos educativos como en proyectos de transición energética.

5. AGRADECIMIENTOS

Los participantes de este proyecto agradecemos a CETYS Universidad por el espacio para realizar investigación de vanguardia en el área de energías alternas y generación de hidrógeno verde.



6. REFERENCIAS

- [1] “Estadísticas de consumo energético mundial | Enerdata.” Accessed: Aug. 07, 2025. [Online]. Available: <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>
- [2] Juárez-Casildo, V., González Huerta, R. de G., and Cervantes, I. (2024), “Prospectivas de la cadena de valor del hidrógeno en México hacia 2050: perspectivas globales desafíos locales,” vol. 39, no. 12, p. 67, 2024.
- [3] F. Araújo, R. C. Neto, and A. S. Moita, “Alkaline water electrolysis: Ultrasonic field and hydrogen bubble formation,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 78, pp. 594–603, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.263.
- [4] M. M. Mohideen et al., “Techno-economic analysis of different shades of renewable and non-renewable energy-based hydrogen for fuel cell electric vehicles,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 174, p. 113153, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113153.
- [5] M. Newborough and G. Cooley, “Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours,” *Fuel Cells Bull.*, vol. 2020, no. 11, pp. 16–22, Nov. 2020, doi: 10.1016/S1464-2859(20)30546-0.
- [6] M. I. Aydin, A. E. Karaca, A. M. M. I. Qureshy, and I. Dincer, “A comparative review on clean hydrogen production from wastewaters,” *J. Environ. Manage.*, vol. 279, p. 111793, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111793.
- [7] S. H. Chang and M. F. Rajuli, “An overview of pure hydrogen production via electrolysis and hydrolysis,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 84, pp. 521–538, Sept. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.245.
- [8] W. J. Martínez-Burgos et al., “Hydrogen: Current advances and patented technologies of its renewable production,” *J. Clean. Prod.*, vol. 286, p. 124970, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124970.
- [9] P. Narputro, P. Effendi, I. M. Akbar, and S. Rahman, “Analysis of the Role of Temperature and Current Density in Hydrogen Production via Water Electrolysis: A Systematic Literature Review,” *Eng. Proc.*, vol. 107, no. 1, p. 23, 2025, doi: 10.3390/engproc2025107023.
- [10] U. S. Meda, Y. V. Rajyaguru, and A. Pandey, “Generation of green hydrogen using self-sustained regenerative fuel cells: Opportunities and challenges,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 73, pp. 28289–28314, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.430.