



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ASEGURAMIENTO DE
LA CALIDAD BASADO EN EL ANÁLISIS DE RIESGOS PARA
EL PROCESO DE ENSAMBLE DE BATERÍAS DE LITIO-
FERROFOSFATO.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO INDUSTRIAL

P R E S E N T A

JORGE LARA LÓPEZ

DIRECTOR DE TESIS

DRA. CRISTINA ARELY DE LEON CONDES

PACHUCA HIDALGO 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 8 de mayo de 2026

Número de control: ICBI-D/916/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Industrial **Jorge Lara López**, quien presenta el trabajo de titulación **"Implementación de un sistema de aseguramiento de la calidad basado en el análisis de riesgos para el proceso de ensamble de baterías de litio-ferrofosfato"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Mtra. Lidia Ramírez Quintanilla

Secretario: Dr. Sergio Blas Ramírez Reyna

Vocal: Dra. Cristina Arely De León Condes

Suplente: Dra. Mayra Rivera Anaya

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184

Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001

direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

GVR/MMM

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

Agradecimientos

Este trabajo de tesis representa la terminación de años de esfuerzo y dedicación, un proceso que no habría sido posible recorrer sin el apoyo de muchas personas especiales a quienes hoy deseo expresar mi más profunda gratitud.

Dedico este logro a la memoria de mi madre, María Esther López Muñoz. Aunque su ausencia física pesa cada día, su amor, su fuerza y sus enseñanzas han sido importantes para mi crecimiento. Ella me enseñó el valor de la perseverancia y a nunca rendirme ante los desafíos.

A mi padre, Juan Carlos Lara Hernández, por ser mi ejemplo de trabajo, constancia y por su apoyo incondicional en cada decisión que he tomado.

A mis abuelas, María Catalina Concepción Muñoz Hernández y Leslie Hernández Olmos, por su cariño infinito, sus consejos y por ser pilares importantes en mi vida. A mis hermanos, Carlos y Juan Antonio, el respaldo de todos ustedes ha sido mi pilar fundamental en mi vida.

Agradezco a la Dra. Cristina Arely de León Condes, por su guía, paciencia y apoyo durante todo este proceso. Su experiencia, su rigor metodológico y su retroalimentación constante fueron muy importantes para estructurar y llevar a buen término este proyecto.

Quiero extender un agradecimiento especial a la empresa por abrirme sus puertas y confiar en mí para el desarrollo de este importante proyecto. A mis compañeros y amigos dentro de la empresa, gracias por su invaluable colaboración, por compartir su conocimiento y por crear un ambiente de trabajo que impulsó y enriqueció esta tesis.

Resumen

Este trabajo presenta el diseño e implementación de un Sistema de Control y Aseguramiento de la Calidad para el proceso de ensamblaje de baterías recargables de iones de litio LiFePO_4 en una empresa a la integración de este producto. El estudio abordó problemas críticos derivados de procedimientos empíricos y la falta de estandarización, lo que generó una alta variabilidad en la confiabilidad y seguridad del producto. Mediante una metodología de ingeniería industrial, se realizó un diagnóstico utilizando herramientas como diagramas de Pareto, diagramas de Ishikawa y el Análisis de Modos y Efectos de Fallo (AMEF) para identificar las causas raíz en las etapas eléctricas, de ensamblaje y de balanceo de celdas. La intervención se centró en estandarizar los métodos de ensamblaje e implementar un sistema de Indicadores Clave de Desempeño (KPI) monitoreado a través del diseño de un panel digital. Los resultados de una fase piloto de tres meses (del mes de septiembre al mes de diciembre de 2025) demuestran una mejora significativa en la estabilidad del proceso. Los hallazgos clave incluyen una reducción de los defectos eléctricos importante, logrando obtener un promedio de cumplimiento del 100% durante el mes de diciembre del 2025, una eficiencia del 97.1% en la soldadura por puntos (Rendimiento en la Primera Pasada) y un cumplimiento del 100% en los protocolos de balanceo de celdas. Además, la precisión de la configuración del Sistema de Gestión de Baterías alcanzó el 99,5% mediante la introducción de interfaces de software especializadas. Estas mejoras eliminaron costos de retrabajo, garantizando la seguridad térmica y eléctrica del producto final, en beneficio de la satisfacción de las necesidades de los clientes en cumplimiento normativo en la fabricación de baterías de litio.

Palabras clave: *Calidad, baterías de LiFePO_4 , Sistema de Gestión de Baterías (BMS), Indicadores clave de rendimiento (KPI), Análisis de Modos y Efectos de Fallo (AMEF), Estandarización de procesos.*

Índice

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
CAPÍTULO 1: PROPÓSITO Y ORGANIZACIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.4 HIPÓTESIS	4
1.5 ALCANCE Y LIMITACIONES	4
1.5.1 <i>Alcance</i>	4
1.5.2 <i>Limitaciones</i>	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 GESTIÓN DE LA CALIDAD	6
2.1.1 <i>Aseguramiento de Calidad</i>	7
2.2 TRAZABILIDAD EN PROCESOS DE MANUFACTURA	10
2.2.1 <i>Definición de Trazabilidad</i>	10
2.2.2 <i>Tipos de trazabilidad</i>	10
2.2.3 <i>Componentes tecnológicos clave de la trazabilidad</i>	11
2.3 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE CALIDAD (AMEF, ISHIKAWA, PARETO, SIPOC Y KPI)	12
2.3.1 <i>AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Falla)</i>	12
2.3.2 <i>Diagrama de Ishikawa (Causa-Efecto)</i>	13
2.3.3 <i>Diagrama de Pareto</i>	14
2.3.4 <i>Diagrama SIPOC</i>	16
2.3.5 <i>Indicadores de Desempeño (KPIs)</i>	17
2.4 BATERÍAS DE IONES DE LITIO DE ÚLTIMA GENERACIÓN BASADAS EN LiFePO ₄	17
2.4.1 <i>Mecanismo de funcionamiento</i>	19
2.4.2 <i>Estrategias de mejora y avances recientes</i>	21

2.4.3 Estabilidad térmica y seguridad operativa	21
2.5 NORMAS Y ESTÁNDARES APLICABLES A BATERÍAS LiFePO_4	22
2.5.1 UL 1973: Baterías para uso en aplicaciones de energía auxiliar para vehículos y de almacenamiento de energía estacionaria.....	22
2.5.2 IEC 62133-2: Requerimientos de seguridad para baterías de litio portátiles	22
2.5.3 UL 2580: Estándares para uso de baterías en vehículos eléctricos.....	22
2.5.4 ISO 26262: Seguridad funcional en vehículos.....	23
2.5.5 IEC 62619: Safety requirements for secondary lithium batteries for industrial applications.....	24
2.6 SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS (BMS)	25
2.6.1 Funciones críticas y control del BMS	25
2.6.2 Diseño y arquitectura del Sistema de Gestión de Baterías (BMS)	26
2.6.3 Parámetros del BMS y curva de descarga de la química LiFePO_4	26
2.6.4 Defectos de manufactura de baterías en las fallas del Sistema de Gestión de Baterías (BMS).....	27
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	28
3.1 METODOLOGÍA GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN.....	28
3.2 DIAGNÓSTICO DEL PROCESO ACTUAL	29
3.2.1 Descripción general del proceso de ensamble de baterías	29
3.2.2 Análisis SIPOC de proceso actual	32
3.2.3 Diagrama de Pareto sobre defectos más frecuentes	34
3.2.4 Identificación de puntos críticos de calidad	37
3.2.5 Diseño de matriz de criticidad para puntos críticos de calidad en proceso de ensamble de baterías	41
3.3 DISEÑO DEL SISTEMA PROPUESTO.....	47
3.3.1 Proceso: Inspección física de las celdas	47
3.3.2 Proceso: Inspección funcional de celdas.....	52
3.3.3 Proceso: Carga de celdas	54
3.3.4 Proceso: Descarga de celdas.....	57
3.3.5 Proceso: Clasificación de celdas.....	60

3.3.6 Proceso: <i>Ensamble de celdas</i>	64
3.3.7 Proceso: <i>Conexión de cables balanceadores del Sistema de Gestión de Baterías (BMS)</i>	66
3.3.8 Proceso: <i>Conexión del Sistema de Gestión de Baterías (BMS)</i>	70
3.3.9 Proceso: <i>Revestimiento de la batería</i>	73
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	77
4.1 IMPLEMENTACIÓN PILOTO	77
4.1.1 <i>Mejora en clasificación de celdas</i>	78
4.1.2 <i>Mejora en ensamble y configuración del Sistema de Gestión de Baterías (BMS)</i>	82
4.1.3 <i>Mejora en la soldadura de celdas</i>	84
4.1.4 <i>Mejora en la conexión de módulos e integración del cableado</i>	86
4.1.5 <i>Mejora en revestimiento de pack de batería</i>	86
4.1.6 <i>Implementación y seguimiento de KPIs</i>	87
4.1.7 <i>Reevaluación de NPR (Número de Prioridad de Riesgo) en AMEF</i>	93
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
RECOMENDACIONES PARA LA EMPRESA	96

Índice de Tablas

Tabla 1: Análisis SIPOC de proceso actual de ensamble de baterías	32
Tabla 2: Análisis de defectos presentados en proceso de ensamble de baterías (1 de abril- 1 septiembre 2025)	34
Tabla 3: Agrupación por categoría técnica de defectos (A).....	35
Tabla 4: Agrupación por categoría técnica de defectos (B).....	35
Tabla 5: Agrupación por categoría técnica de defectos (C).....	35
Tabla 6:Tabla consolidada de defectos por categoría técnica	35
Tabla 7: Tabla consolidada de posibles causas en defectos en el proceso de ensamble de baterías.....	38
Tabla 8: Tabla resumen de puntos críticos de calidad observados en el proces de ensamble de baterías.....	40
Tabla 9: Tabla de relación de valores de severidad	42
Tabla 10: Tabla de relación de valores de ocurrencia	43
Tabla 11: Tabla de relación de valores de detección.....	43
Tabla 12:Matriz de puntos críticos de calidad en proceso de ensamble de batería	44
Tabla 13: Formato consolidado de análisis AMEF	46
Tabla 14: Proceso de inspección física de celdas	47
Tabla 15: Proceso de inspección funcional de celdas	52
Tabla 16: Proceso de carga de celdas	54
Tabla 17: Proceso de descarga de celdas	58
Tabla 18: Proceso de clasificación de celdas.....	61
Tabla 19: Tabla de parámetros de voltaje para clasificación de celdas	63
Tabla 20: Proceso de ensamble de celdas	64
Tabla 21: Proceso de conexión de cables balanceadores del Sistema de Gestión de Baterías (BMS)	66
Tabla 22: Proceso de conexión de BMS	70
Tabla 23: Proceso de revestimiento de batería.....	73
Tabla 24: Formulación de KPIs.....	76

Tabla 25: Tabla de diferencias antes y después de la aplicación de mejora de clasificación de celdas.....	80
Tabla 26: Comparación antes y después de mejoras.....	93
Tabla 27: Reevaluación de NPR en análisis AMEF	94

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: puntos clave contenidos en el AMEF	13
Ilustración 2: Estructura clásica del diagrama de Ishikawa.	14
Ilustración 3: Fases de construcción de diagrama Ishikawa.....	14
Ilustración 4: Fases de ejecución de Diagrama de Pareto	15
Ilustración 5: Estructura conceptual de metodología SIPOC.....	16
Ilustración 6: Mecanismo de funcionamiento de baterías LiFePO_4	20
Ilustración 7: Sistema de gestión de baterías (BMS) acoplado a un paquete de baterías en un vehículo eléctrico.	26
Ilustración 8: Curva de descarga LiFePO_4 vs Litio Ion. Elaboración propia.....	27
Ilustración 9: Flujograma de proceso actual de ensamble de baterías	31
Ilustración 10: Diagrama de Pareto de defectos más frecuentes en ensamble de baterías LiFePO_4	36
Ilustración 11: Diagrama Ishikawa de defectos en ensamble de baterías	38
Ilustración 12: Flujograma de proceso: Inspección física de celdas	48
Ilustración 13: Formato de recepción de materiales de almacén	49
Ilustración 14: Formato de registro de no conformidades en celdas LiFePO_4	50
Ilustración 15: Ayuda visual de inspección de no conformidades para baterías LiFePO_4	51
Ilustración 16: Flujograma de proceso de inspección funcional de celdas	53
Ilustración 17: Flujograma de proceso de carga de celdas	55
Ilustración 18: Código de caja de almacenamiento	56
Ilustración 19: Codificación de celdas	56
Ilustración 20: Etiqueta de aceptación de caja de almacenamiento.....	57
Ilustración 21: Flujograma de proceso de descarga de celdas	59
Ilustración 22: Formato de registro de celdas mod. 18650 y 21700.....	60
Ilustración 23: Flujograma de proceso de clasificación de celdas.....	62
Ilustración 24: Base de datos de organización de celdas.....	63
Ilustración 25: Flujograma de proceso de ensamble de celdas.....	65
Ilustración 26: Flujograma de proceso de conexión de cables balanceadores de BMS	67

Ilustración 27: Valores de referencia en voltaje en cables balanceadores	68
Ilustración 28: Ayuda visual de soldadura de celdas y cables balanceadores de BMS	69
Ilustración 29: Flujograma de proceso de conexión de BMS.....	71
Ilustración 30: Ayuda visual de conexión de BMS	72
Ilustración 31: Flujograma de proceso de revestimiento de batería	74
Ilustración 32: Formato de lista de chequeo de inspección de baterías LiFePO_4 .	75
Ilustración 33: Implementación de codificación de celdas	78
Ilustración 34: Implementación de codificación en cajas de almacenamiento de celdas.....	79
Ilustración 35: Base de datos de organización de celdas	81
Ilustración 36: Diseño CAD de ensamble de BMS	82
Ilustración 37: Evidencia de instalación de BMS en pack de batería	83
Ilustración 38: Lista de chequeo de valores en voltajes de cables balanceadores	83
Ilustración 39: Implementación de lista de chequeo de baterías LiFePO_4	84
Ilustración 40: Soldadura de celdas antes de la implementación de mejoras	85
Ilustración 41: Soldadura de celdas después de la implementación de mejoras...	85
Ilustración 42: Mejora en conexión de módulos e integración de cableado.....	86
Ilustración 43: Mejora en revestimiento de pack de batería	87
Ilustración 44: Implementación de KPI's mediante uso de software Excel.....	88

Índice de Gráficos

Gráfico 1:KPI de configuración correcta de BMS mensual.....	89
Gráfico 2: KPI de defectos eléctricos por ensamble mensual	89
Gráfico 3: KPI de calidad en soldadura de celdas mensual	90
Gráfico 4: KPI de ensamble de módulos sin retrabajo mensual.....	91
Gráfico 5: KPI de balanceo de celdas previo al ensamble mensual	91

CAPÍTULO 1: PROPÓSITO Y ORGANIZACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La empresa en la que se desarrollará este proyecto se está consolidando en el sector de fabricación de baterías de litio ferrofosfato (LiFePO_4) orientadas a aplicaciones de electromovilidad, como carritos de golf, micromovilidad y conversiones de motocicletas. Actualmente enfrenta retos debido a que su proceso de ensamble de baterías LiFePO_4 se realizaba bajo procedimientos empíricos. Esta falta de estandarización ha derivado en variabilidad del producto, específicamente en fallas eléctricas y de ensamble lo que representa amenaza para la fiabilidad del producto, generar un producto final con bajo desempeño o incluso riesgos de seguridad.

La ausencia de un sistema de control de calidad formal compromete la seguridad eléctrica y térmica de las baterías, incrementando los costos por retrabajos y limitando la trazabilidad indispensable para cumplir con estándares.

Ante esta situación, surge la necesidad de establecer un sistema de control de calidad estructurado que permita asegurar la funcionalidad, trazabilidad, confiabilidad y seguridad de las baterías durante su proceso de ensamble.

1.2 Justificación

La implementación de un sistema de control y aseguramiento de calidad en el ensamble de baterías de litio ferrofosfato (LiFePO_4) responde a la necesidad de pasar de prácticas empíricas a gestión técnica de acuerdo a estándares establecidos. El objetivo central es reducir la variabilidad del proceso y controlar riesgos de seguridad, garantizando el cumplimiento de requisitos de desempeño eléctrico y térmico en los Sistemas de Gestión de las baterías.

Aunque la química LiFePO_4 destaca por su estabilidad térmica, su curva de descarga plana exige una configuración precisa del Battery Management System (BMS) para evitar sobre descargas que deterioran de forma irreversible las celdas. En los análisis mediante herramientas de calidad como Pareto e Ishikawa se evidencian defectos provenientes de fallas eléctricas, seguido por problemas en soldadura y desbalanceo. La ausencia de control formal afecta la integridad del producto, incrementa retrabajos y limita la trazabilidad requerida por normas como IEC 62619 y UL 2580.

La intervención genera impacto económico al reducir desperdicio de material y retrabajos mediante control del proceso y optimización de soldadura por puntos. El balanceo y la clasificación de celdas prolongan la vida útil de los paquetes y disminuyen la generación de residuos electrónicos. A nivel tecnológico, se integra trazabilidad digital con monitoreo de parámetros críticos del proceso.

La implementación de un sistema de control y aseguramiento de calidad en el proceso de ensamble de baterías permitirá optimizar la producción mediante la reducción de retrabajos y la disminución de productos defectuosos, y también establecerá criterios claros de aceptación y rechazo que faciliten la uniformidad en la evaluación de los productos.

Esta mejora en los procedimientos incrementará la confianza del cliente en el producto final y, al mismo tiempo, fomentará el desarrollo de estándares de calidad en una empresa emergente, fortaleciendo su competitividad en el mercado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Implementar un sistema para control y aseguramiento de la calidad en el proceso de ensamble de baterías LiFePO_4 en empresa ensambladora, incorporando trazabilidad del proceso y gestión de información basada en Microsoft Excel, para mejorar la estabilidad operativa y reducir defectos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar la situación actual del proceso de ensamble de baterías mediante herramientas de calidad, como diagramas de Pareto e Ishikawa, para identificar y jerarquizar fallas críticas.
- Evaluar riesgos operativos del proceso mediante la metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF), determinando el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) en puntos críticos de calidad.
- Implementar sistema de trazabilidad del proceso, apoyado en base de datos desarrollada en Microsoft Excel, que permita monitoreo y control de parámetros eléctricos de las celdas desde la recepción hasta el producto final.
- Validar la efectividad del sistema de control y aseguramiento de la calidad mediante implementación piloto de tres meses, evaluando impacto a través de indicadores clave de desempeño (KPIs) enfocados en reducción de defectos y mejora de la estabilidad del proceso.

1.4 Hipótesis

La implementación de un sistema de control y aseguramiento de calidad en el proceso de ensamble de baterías de litio ferrofosfato reducirá significativamente la variabilidad de los productos y los defectos en el ensamble final.

1.5 Alcance y limitaciones

1.5.1 Alcance

La presente investigación tiene como alcance principal el análisis y la propuesta de mejora en el sistema de gestión de calidad de una empresa ensambladora de baterías, enfocándose específicamente en los procesos de ensamble de baterías de litio ferrofosfato (LiFePO_4).

El estudio se orienta a identificar las principales áreas de oportunidad dentro de las actividades operativas del área de calidad y producción, con el propósito de establecer lineamientos, controles y herramientas de mejora continua que contribuyan a optimizar la eficiencia, reducir defectos y fortalecer la confiabilidad del producto final.

El proyecto busca generar una base documental y metodológica que permita a la organización implementar en el futuro un sistema de gestión de calidad formal, alineado a estándares como la norma ISO 9001:2015.

El alcance también incluye la evaluación de los procedimientos actuales, la recolección de datos mediante observación directa y la propuesta de estrategias de control y mejora adaptadas a la capacidad técnica y operativa de la empresa.

1.5.2 Limitaciones

Entre las principales limitaciones del presente trabajo se encuentra el hecho de que la empresa se encuentra en una etapa de crecimiento y consolidación, por lo que algunos procesos aún no están completamente estandarizados ni documentados. Esta situación puede limitar la disponibilidad de la información para el análisis comparativo.

Otra limitación identificada es la disponibilidad de los recursos materiales y humanos, ya que el tamaño reducido de la empresa y la carga laboral pueden limitar la aplicación inmediata de algunas mejoras propuestas para el proceso.

El proyecto se limita al proceso de ensamble de baterías, sin tomar en cuenta de manera profunda otras áreas relacionadas al proceso de ensamble, como el diseño de producto, el desarrollo de software o el control electrónico.

Adicionalmente, por políticas internas de confidencialidad, la empresa no permite la divulgación de datos sensibles que estén relacionados con sus procesos, materiales o proveedores. Por este motivo, la información presentada se muestra solo de manera general, garantizando la protección de los datos internos de la empresa.

Esta investigación se desarrollará en un periodo limitado de tiempo, lo cual puede condicionar el alcance de las pruebas piloto y la validación completa de las estrategias propuestas. Sin embargo, se establecerán bases sólidas para futuras investigaciones o proyectos de implementación del sistema de gestión de calidad en la empresa.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Gestión de la calidad

La gestión de la calidad es un enfoque administrativo que busca asegurar que los productos, servicios y procesos de una organización cumplan consistentemente con los requisitos del cliente y los estándares establecidos. Su propósito es lograr la mejora continua, la satisfacción del cliente y la eficiencia operativa a través de una planificación, control y mejora sistemática de los procesos.

Según Juran (1990), la gestión de la calidad se centra en tres procesos conocidos como la Trilogía de Juran: planificación de la calidad, control de la calidad y mejora de la calidad. Estos procesos pueden permitir a las organizaciones diseñar productos y servicios que puedan satisfacer las necesidades de los clientes, evitando fallas y retrabajos.

Deming (1986) planteó que la calidad debe ser vista como un proceso continuo que involucra a todos los niveles de la organización. Propuso 14 puntos para la gestión de la calidad, los cuales constituyen una guía para transformar la cultura organizacional hacia la mejora continua y el enfoque al cliente.

La norma ISO 9001:2015 también define la gestión de la calidad como “un conjunto de actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización en lo relativo a la calidad”. Esta norma promueve el enfoque basado en procesos y el ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar) como método para poder alcanzar la mejora continua (ISO, 2015).

2.1.1 Aseguramiento de Calidad

El aseguramiento de calidad es la capacidad de una organización para garantizar la entrega de productos seguros y de alta calidad al consumidor final mediante el seguimiento de todas las etapas de la cadena de suministro. En el ámbito industrial, este concepto se presenta una meta y beneficio directo de la implementación de sistemas. La trazabilidad además de ser un registro funciona como herramienta fundamental que permite garantizar productos seguros y de alta calidad.

Un sistema de aseguramiento de calidad robusto utiliza la trazabilidad para identificar rápidamente las fuentes de problemas y errores en el proceso de producción. Esto permite una respuesta inmediata ante riesgos (como brotes de enfermedades en la industria alimentaria), limitando el impacto y asegurando que solo los productos conformes lleguen al mercado.

Pilares técnicos del aseguramiento: Para que el aseguramiento de calidad sea efectivo, el sistema debe basarse en tres mecanismos fundamentales:

- Identificación única: Distinguir cada unidad rastreable (TRU) para un control preciso.
- Documentación de transformaciones: Registrar cómo se mezclan o dividen los materiales durante la producción.
- Registro de atributos: Documentar datos críticos como la temperatura, el peso y los controles de laboratorio vinculados a cada unidad.

El aseguramiento de la calidad moderno busca la transparencia total. Los consumidores actuales demandan saber "qué hay detrás" del producto, y un sistema de aseguramiento de calidad que utiliza trazabilidad permite a las empresas respaldar sus afirmaciones de calidad (como el origen orgánico o la higiene) con datos en tiempo real.

La implementación de un sistema de aseguramiento de calidad no es solo técnica; implica un cambio en la cultura y el modelo de negocio. Requiere capacitación constante del personal para crear una conciencia sobre la importancia de la higiene y la seguridad en cada fase del proceso. La Trazabilidad actúa como soporte del aseguramiento de la calidad

Los autores definen la trazabilidad como la capacidad de generar conocimiento sobre dónde, cuándo, cómo y de qué materiales se fabricó un producto

El aseguramiento de la calidad, se traduce en prevención y control: Permite el control e identificación de cada fase de manipulación de un producto, asegurando que se sigan los estándares de higiene y seguridad.

La trazabilidad por sí sola no mejora los resultados de seguridad alimentaria o industrial, pero es la herramienta que, al aplicarse, contribuye a la efectividad de las medidas de seguridad del producto. Facilita la detección de defectos y la identificación de las causas raíz de los problemas de producción para evitar que se repitan. Se clasifican tres tipos de trazabilidad:

- Trazabilidad hacia atrás (Backward): Referente al origen de los materiales y componentes antes del proceso de producción.
- Trazabilidad interna: Se enfoca en el control del producto durante la etapa de producción dentro de la empresa.
- Trazabilidad hacia adelante (Forward): Incluye la identificación del cliente y la logística post-producción.

La implementación de sistemas de trazabilidad ofrece beneficios directos al aseguramiento que van más allá del simple cumplimiento normativo:

- Gestión de Riesgos y Recaudación (Recalls): Permite responder a riesgos de salud (como brotes de salmonela) de manera rápida y efectiva, limitando

el alcance de los retiros de productos a lotes específicos y ahorrando costos significativos.

- **Transparencia y Confianza:** Los consumidores actuales demandan saber "qué hay detrás" del producto. La trazabilidad permite a las empresas respaldar sus afirmaciones de calidad (por ejemplo, productos orgánicos o sustentables) con datos verificables.
- **Certificaciones y Mercados Internacionales:** Contar con un sistema robusto es una ventaja competitiva y, a menudo, una barrera de entrada obligatoria para mercados exigentes como la Unión Europea o Estados Unidos.

Para que la trazabilidad sea útil al aseguramiento de calidad, los sistemas deben cumplir con ciertos requisitos funcionales:

- **Identificación única:** Cada unidad de recurso trazable debe tener un código que la distinga.
- **Registro de atributos:** Se deben documentar tiempos de manufactura, composición de materiales y atributos de procesamiento.
- **Integración de datos:** La capacidad de vincular la información de trazabilidad con otros datos de calidad y mediciones de sensores para análisis posteriores.

El aseguramiento de la calidad define los estándares y procedimientos para prevenir errores, la trazabilidad proporciona la infraestructura de datos necesaria para verificar que esos estándares se cumplan y actuar con precisión cuando ocurre una desviación (De la Torre Dávila et al., 2021; Laukkanen et al., 2021).

2.2 Trazabilidad en procesos de manufactura

2.2.1 Definición de Trazabilidad

La trazabilidad es la capacidad de rastrear y seguir el historial, la aplicación o la ubicación de un objeto o producto. Esto implica tener documentación de cada parte del proceso de producción, desde la recepción de materias primas hasta la entrega del producto terminado al cliente. Según la Organización Internacional de Normalización (ISO), “la trazabilidad permite obtener información sobre un producto a través de su identificación registrada” (ISO 9001:2015, 2015).

La trazabilidad es un factor estratégico en los sistemas productivos. Su implementación responde a la necesidad de asegurar la calidad, optimizar la cadena de suministro y cumplir con normativas cada vez más estrictas en un entorno competitivo (Mora, 2015).

2.2.2 Tipos de trazabilidad

Trazabilidad hacia atrás (Upstream): Se enfoca en el origen de los componentes y materias primas. Esta trazabilidad permite identificar a los proveedores, los lotes de material recibidos y las fechas de recepción. Es importante gestionar la calidad de los insumos y aislar problemas relacionados con proveedores (Moe, 1998).

Trazabilidad de proceso (Interna): Este tipo de trazabilidad monitorea el movimiento y la transformación de los materiales dentro de la planta de producción. Registra cómo se combinan los lotes de materia prima, en qué máquinas se procesan, los parámetros de operación y los resultados de las inspecciones de calidad internas. El objetivo de la trazabilidad de proceso es controlar y optimizar las operaciones internas para asegurar la conformidad del producto (Anaya, 2015).

Trazabilidad hacia adelante (Downstream): Este tipo de trazabilidad monitorea la ruta del producto ya terminado una vez que sale de la fábrica. Permite conocer qué lote ha sido expedido, a qué cliente, en qué cantidad y la fecha de

entrega. Esta capacidad es importante para una gestión logística eficiente y para ejecutar retiradas de mercado (recalls) de manera rápida y selectiva (Mora, 2015).

2.2.3 Componentes tecnológicos clave de la trazabilidad

Sistemas de Identificación: Se centran en asignar una identidad a cada producto o lote. Esto se puede lograr con códigos de barras, códigos QR (Quick Response) o etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID).

Sistemas de Captura de Datos: En estos sistemas se utilizan escáneres, sensores y terminales portátiles para leer las identificaciones y registrar datos en puntos clave del proceso. La automatización en esta etapa es muy importante para minimizar el error humano y asegurar la integridad de la información.

Software de Gestión: Los datos capturados se centralizan y gestionan en sistemas de software como los Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES) o se integran en los Sistemas de Planificación de Recursos Empresariales (ERP). Estas plataformas de software conectan la información del producto con los datos de producción, inventario y distribución para crear un registro completo y accesible (Heizer & Render, 2017).

2.3 Herramientas de análisis de calidad (AMEF, Ishikawa, Pareto, SIPOC y KPI)

2.3.1 AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Falla)

Según Carlson (2012), el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF por sus siglas en inglés) es una herramienta sistemática que permite identificar y priorizar los posibles modos de falla en un proceso, producto o sistema.

Su objetivo es evaluar el impacto de cada falla potencial, su probabilidad de ocurrencia y su capacidad de detección, para tomar acciones preventivas antes de que los problemas lleguen al cliente.

Stamatis (2003) amplía esta visión al señalar que el AMEF no se limita a ser un método de prevención, también es una metodología integrada de mejora continua que permite fortalecer la confiabilidad del diseño y la producción. Por su parte, Liu (2016) propone la aplicación del AMEF en entornos inciertos mediante métodos multicriterio (MCDM) y teorías de incertidumbre, optimizando la toma de decisiones basadas en riesgos.

En la línea de ensamble de baterías LiFePO_4 , donde los defectos pueden desencadenar riesgos críticos de seguridad, esta metodología es importante para el aseguramiento de la calidad.

Para ilustrar la estructura de esta herramienta, en la Ilustración 1 se muestran los puntos clave que debe tener el AMEF, según lo recomendado por Carlson (2012).

Proceso	Punto Crítico	Riesgo principal
Severidad (S)	Consecuencia potencial	Ocurrencia (O)
Tipo de control requerido	Detección (D)	NPR (Número de Prioridad de Riesgo)

Ilustración 1: puntos clave contenidos en el AMEF. Extraído y modificado (Carlson, 2012).

2.3.2 Diagrama de Ishikawa (Causa-Efecto)

El Diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de causa-efecto o espina de pescado, es una herramienta visual desarrollada por Kaoru Ishikawa en la década de 1940.

Su propósito principal es identificar, explorar y representar gráficamente todas las posibles causas relacionadas con un problema específico para descubrir su causa raíz en lugar de solo atender los síntomas (Evans & Lindsay, 2020).

En el contexto del ensamble de celdas LiFePO_4 , esta herramienta resulta de gran importancia, ya que permite identificar y categorizar las causas potenciales de los defectos que se presentan de acuerdo con su estructura más habitual, "6 M" (Mano de obra, Métodos, Maquinaria, Materiales, Medición y Medio ambiente), tal como se muestra en la Ilustración 2.

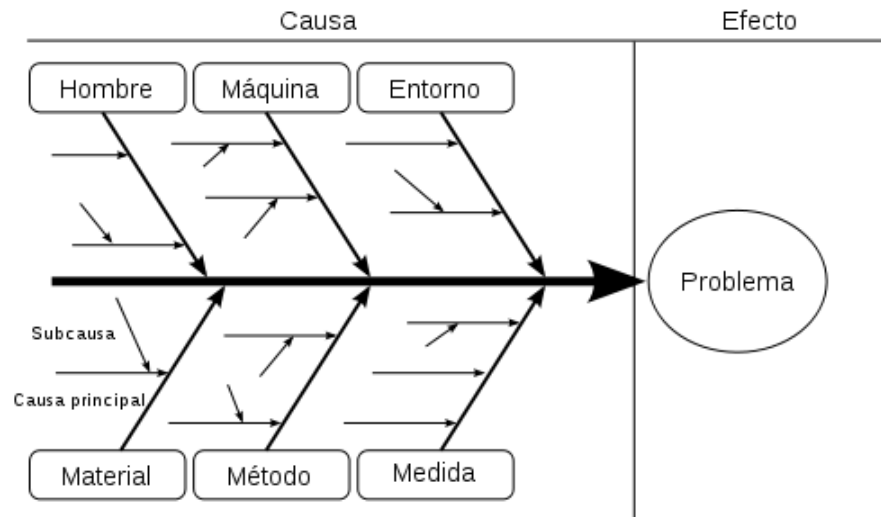


Ilustración 2: Estructura clásica del diagrama de Ishikawa. Elaboración propia.

Aplicar esta metodología en el proceso de ensamble de celdas facilita una investigación sistemática y ayuda a evitar que problemas críticos, como malas conexiones o soldaduras deficientes, se repitan en futuras órdenes de producción. A manera de representación teórica, en la Ilustración 3 se exponen las principales fases de construcción del diagrama de Ishikawa.



Ilustración 3: Fases de construcción de diagrama Ishikawa. Elaboración propia.

2.3.3 Diagrama de Pareto

El principio de Pareto, propuesto por Vilfredo Pareto y aplicado al control de calidad, establece que aproximadamente el 80% de los problemas provienen del 20% de las causas. Según Mineva (2020), el diagrama de Pareto es una herramienta importante para priorizar las causas o defectos más significativos dentro de un proceso. Permite a los equipos de calidad concentrar los esfuerzos en los factores que generan el mayor impacto en los defectos.

Esta herramienta combina el análisis cuantitativo y visual, lo que facilita la toma de decisiones, regularmente la estructura del Diagrama de Pareto se realiza tal como se muestra en la Ilustración 3.

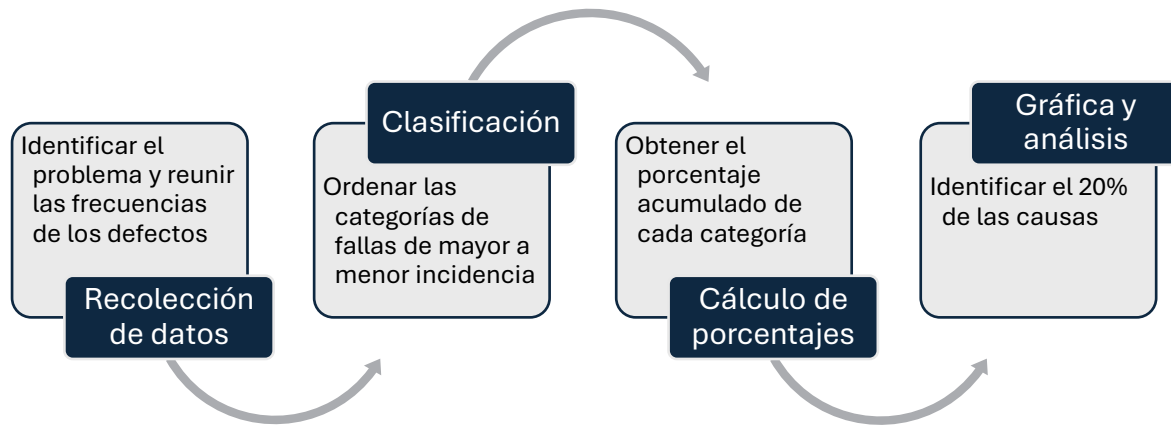


Ilustración 4: Fases de ejecución de Diagrama de Pareto. Elaboración propia.

La aplicación del Diagrama de Pareto en el proceso de ensamble de celdas permite discriminar entre las fallas que afectan gravemente la operatividad del sistema y aquellas incidencias menores. Al priorizar y enfocar los esfuerzos de mejora en los defectos eléctricos y mecánicos más recurrentes, se puede maximizar el impacto positivo en el proceso.

Beneficios:

- Optimización de recursos: Direcciona los esfuerzos hacia el 20% de las causas que resuelven el 80% de los problemas.
- Justificación basada en datos: Proporciona un respaldo basado en la información obtenida para facilitar la toma de decisiones de forma más objetiva.
- Agilidad de respuesta: Permite visualizar rápidamente dónde se concentra la mayor cantidad de defectos, acelerando la capacidad de respuesta para resolver los problemas.

2.3.4 Diagrama SIPOC

El diagrama SIPOC es una herramienta utilizada en la gestión de procesos para identificar y delimitar de manera estructurada los elementos clave de un proceso, antes de realizar análisis más detallados. SIPOC proviene de los términos Suppliers (Proveedores), Inputs (Entradas), Process (Proceso), Outputs (Salidas) y Customers (Clientes), los cuales representan los puntos fundamentales que intervienen en cualquier sistema productivo o administrativo (Pyzdek & Keller, 2018).

Una de las principales ventajas del SIPOC es que ayuda a evitar análisis incompletos o mal enfocados, ya que obliga a definir claramente qué inicia y qué termina el proceso, así como los insumos críticos necesarios para su correcta ejecución. Además, el SIPOC contribuye a detectar problemas o inconsistencias entre las entradas y salidas del proceso, lo cual es fundamental para el aseguramiento de la calidad y la mejora continua (Evans & Lindsay, 2020).

Para ilustrar la estructura de esta metodología, en la Ilustración 5 se expone la estructura de un diagrama SIPOC.

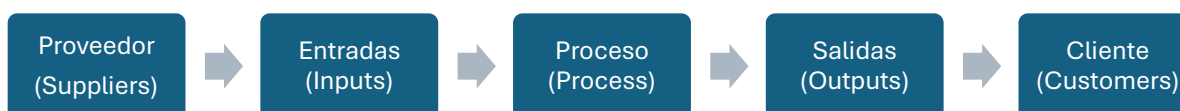


Ilustración 5: Estructura conceptual de metodología SIPOC. Extraído y modificado (Evans & Lindsay, 2020)

En el caso de ensamble de baterías de litio, el diagrama SIPOC es especialmente útil para identificar puntos críticos de calidad, dependencias entre áreas y riesgos que están asociados a materiales, información o recursos humanos. Esta herramienta permite establecer fundamentos para la aplicación posterior de metodologías como AMEF, diagramas de flujo detallados e indicadores de desempeño.

2.3.5 Indicadores de Desempeño (KPIs)

Los Indicadores Clave de Desempeño (Key Performance Indicators, KPIs) son métricas cuantitativas utilizadas por las organizaciones para evaluar el nivel de cumplimiento de objetivos estratégicos, operativos y de calidad. Estos indicadores permiten medir el desempeño de procesos, productos y personas, proporcionando información objetiva que facilita la toma de decisiones basada en datos (Parmenter, 2015). Los KPIs deben estar alineados con la estrategia de la organización y reflejar los factores críticos que determinan el éxito del negocio.

Desde el enfoque de la gestión de la calidad, los KPIs cumplen una función esencial al monitorear la eficacia y eficiencia de los procesos, permitiendo identificar desviaciones, tendencias negativas y oportunidades de mejora continua. La norma ISO 9001:2015 enfatiza la necesidad de establecer, medir y analizar indicadores que aseguren el control de los procesos y la conformidad del producto con los requisitos establecidos (ISO, 2015). Un KPI efectivo debe cumplir con características específicas, tales como ser específico, medible, alcanzable, relevante y con un horizonte temporal definido (SMART).

2.4 Baterías de Iones de Litio de Última Generación basadas en LiFePO_4 .

El fosfato de hierro y litio (LiFePO_4), con estructura tipo olivino, es considerado un candidato líder para el cátodo de la próxima generación de baterías de iones de litio (LIB) debido a su sostenibilidad y seguridad. Según Yuan et al., este material destaca por su larga vida útil, abundancia de recursos, baja toxicidad y alta estabilidad térmica (Yuan et al., 2010). Zhao et al. refuerzan esta visión señalando que este tipo de baterías son actualmente las tecnologías dominantes desde la electrónica portátil hasta los vehículos eléctricos, siendo el LiFePO_4 uno de los materiales más atractivos por su estabilidad cíclica y bajo precio.

La estructura del LiFePO_4 es ortorrómbica y pertenece sistema cristalino ortorrómbico. Los átomos de oxígeno forman un arreglo hexagonal compacto ligeramente distorsionado, donde el fósforo ocupa sitios tetraédricos y los metales (Li y Fe) ocupan sitios octaédricos. Zhao et al. explican que en esta celda unitaria los octaedros de FeO_6 y los tetraedros de PO_4 están firmemente unidos por fuertes enlaces covalentes, lo que otorga a la estructura una excelente estabilidad mecánica y seguridad intrínseca durante los ciclos de carga y descarga. Sin embargo, esta misma fortaleza en los enlaces contribuye a una baja conductividad electrónica e iónica.

El funcionamiento de una celda de LiFePO_4 se basa en la intercalación y extracción reversible de iones de litio. Durante la descarga, los iones de litio y los electrones pasan del ánodo al cátodo para neutralizarse, generando una corriente eléctrica externa (Zhao et al., 2021).

- Reacción de dos fases: Yuan et al. describen este proceso como una reacción de dos fases ($\text{LiFePO}_4 \leftrightarrow \text{FePO}_4 + \text{Li}^+ + \text{e}^-$) que resulta en una meseta de voltaje plana de aproximadamente 3.45 V frente a Li^+/Li^0 .
- Zhao et al. mencionan que investigaciones computacionales han identificado que este camino de difusión sigue una trayectoria en "zigzag".
- Modelos de Interfaz: Se han propuesto diversos modelos para explicar esta reacción, como el de "núcleo contraído" (shrinking-core), donde una capa de FePO_4 avanza hacia el centro de la partícula durante la carga, y el modelo "dominó-cascada", que sugiere que una partícula se carga o descarga completamente de forma rápida una vez iniciado el proceso.

El LiFePO_4 enfrenta retos críticos que limitan su aplicación en altas tasas de potencia (high-rate):

- Conductividad limitada: Presenta una pobre conductividad electrónica y una lenta difusión de iones de litio.
- Bloqueo de canales: Dado que la difusión es 1D, cualquier defecto estructural, como el intercambio de posiciones entre iones de Fe y Li (defectos de antisitio), puede bloquear los canales y reducir drásticamente la capacidad.
- Baja densidad de tap: La densidad teórica es menor en comparación con otros óxidos como el LiCoO_2 , lo que limita su densidad de energía volumétrica en dispositivos pequeños (Yuan et al., 2010).

2.4.1 Mecanismo de funcionamiento

El mecanismo de funcionamiento de una batería de iones de litio se basa en el almacenamiento de energía química en dos electrodos con diferentes potenciales electroquímicos: un ánodo (reductor) y un cátodo (oxidante) como se observa en la Ilustración 6. Estos electrodos están separados por un aislante electrónico llamado separador, pero permanecen en contacto a través de un conductor de iones positivos que también actúa como aislante de electrones, conocido como electrolito

El proceso fundamental consiste en la intercalación y extracción reversible de iones de litio dentro de las estructuras de los materiales de los electrodos. Durante el proceso de descarga, la reacción química provoca que los iones de litio y los electrones pasen del ánodo al cátodo para neutralizarse entre sí.

Mientras los iones se mueven internamente a través del electrolito, la corriente de electrones es obligada a fluir por un circuito externo a la celda, donde puede ser aprovechada como corriente eléctrica.

Para cargar la batería, se aplica un voltaje externo que revierte este flujo, enviando los cationes y electrones de vuelta al ánodo.

En el caso específico de las baterías con cátodo de LiFePO_4 , el funcionamiento presenta las siguientes características clave:

- Reacción de dos fases: La extracción e inserción de litio ocurre mediante una reacción donde coexisten las fases LiFePO_4 y FePO_4 ($\text{LiFePO}_4 \leftrightarrow \text{FePO}_4 + \text{Li}^+ + \text{e}^-$), lo que genera una meseta de voltaje plana de aproximadamente 3.45 V frente a Li^+/Li^0 .
- Difusión unidimensional: A nivel microscópico, los iones de litio se transportan a través de la estructura del cristal mediante canales unidimensionales
- Trayectoria en "zigzag": Estudios computacionales de primeros principios indican que el movimiento de los iones de litio dentro de estos canales sigue una trayectoria específica en "zigzag" a lo largo del eje.
- Modelos de interfase: Para explicar cómo avanza la reacción dentro de las partículas, se han propuesto modelos como el de "núcleo contraído" (donde una capa de FePO_4 avanza hacia el centro de la partícula) y el de "dominó-cascada" (donde una partícula se carga o descarga completamente de forma rápida una vez iniciada la reacción).

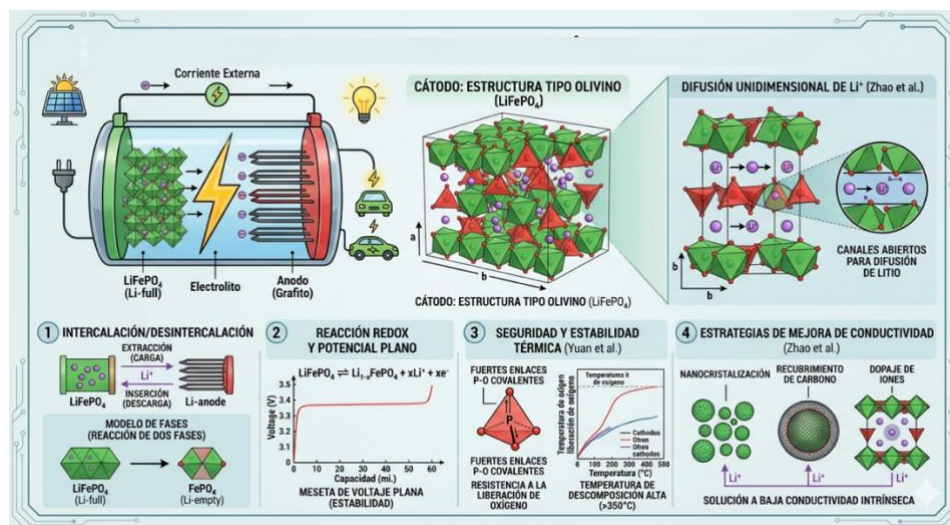


Ilustración 6: Mecanismo de funcionamiento de baterías LiFePO_4 . Extraído de (Yuan et al., 2010).

2.4.2 Estrategias de mejora y avances recientes

Para superar estas limitaciones, Yuan et al. y Zhao et al. destacan varias aproximaciones técnicas:

- **Nanocrystalización:** Reducir el tamaño de las partículas a escala nanométrica acorta las rutas de difusión de los iones y aumenta el área de contacto con el electrolito.
- **Recubrimientos Conductores:** El recubrimiento con carbono es la estrategia más efectiva para mejorar la conductividad electrónica de las partículas. También se ha explorado el uso de polímeros conductores como la polianilina.
- **Dopaje Cationico:** La introducción de pequeñas cantidades de otros metales (como Mn, Co, V o Nb) puede modificar la estructura electrónica, reduciendo la brecha de banda (bandgap) y mejorando así la conductividad y estabilidad mecánica.

2.4.3 Estabilidad térmica y seguridad operativa

Uno de los puntos más fuertes de las baterías de LiFePO_4 es su excelente seguridad. Yuan et al. señalan que los enlaces P-O en los grupos $(\text{PO}_4)^{3-}$ son tan fuertes que no liberan oxígeno fácilmente, lo que evita reacciones peligrosas con el electrolito incluso a temperaturas elevadas. Zhao et al. confirman mediante cálculos de primeros principios que el LiFePO_4 es termodinámicamente más estable que otros materiales de cátodo como el LiCoO_2 o el LiNiO_2 . Esta estabilidad garantiza que la batería pueda soportar miles de ciclos de carga y descarga sin una degradación significativa del material (Yuan et al., 2010; Zhao et al., 2021).

2.5 Normas y estándares aplicables a baterías LiFePO_4

2.5.1 UL 1973: Baterías para uso en aplicaciones de energía auxiliar para vehículos y de almacenamiento de energía estacionaria

La norma UL 1973 hace referencia especialmente a las baterías LiFePO_4 utilizadas en sistemas de almacenamiento de energía residenciales, comerciales e industriales. Evalúa la capacidad de la batería para poder soportar de manera segura sobrecargas, cortocircuitos y condiciones ambientales extremas, enfocándose especialmente en la prevención de riesgos de incendio y descarga eléctrica durante su vida útil (UL Standards, 2018).

2.5.2 IEC 62133-2: Requerimientos de seguridad para baterías de litio portátiles

La norma IEC 62133-2 establece los requisitos de seguridad para celdas secundarias y baterías de litio recargables, enfocándose en el correcto comportamiento de la batería ante condiciones normales de operación y uso previsible indebido. Esta norma es específica para sistemas basados en litio, incluyendo baterías selladas y portátiles para múltiples aplicaciones.

Entre sus contenidos, la IEC 62133-2 toma en cuenta aspectos como la gestión de temperatura, voltaje y corriente para evitar sobrecarga o condiciones térmicas peligrosas, la inspección de aislamiento y contacto de terminales, así como la evaluación de ensayos de uso indebido (cortocircuitos externos, abuso térmico, caídas, estrés mecánico) para poder garantizar la seguridad del usuario y de la batería. (International Electrotechnical Commission, 2017).

2.5.3 UL 2580: Estándares para uso de baterías en vehículos eléctricos

La norma UL 2580 especifica requisitos de seguridad para ensamblajes de almacenamiento de energía eléctrica, tales como packs de baterías y módulos utilizados en vehículos eléctricos.

Esta norma evalúa cómo las baterías pueden responder ante condiciones de abuso simulado como choque térmico, sobrecarga, vibración, impacto físico, con el objetivo de proteger a las personas y reducir las posibilidades de fuego, cortocircuito o fallas durante el uso real.

A diferencia de normas orientadas a pequeños dispositivos portátiles, UL 2580 está enfocada en baterías de alto voltaje y gran capacidad típicas de electromovilidad, midiendo la resistencia a maniobras extremas, variaciones térmicas y otras situaciones que pueden ocurrir en vehículos eléctricos. (Underwriters Laboratories, 2020).

Su aplicación en la industria automotriz y de sistemas de almacenamiento proporciona una evaluación rigurosa de la seguridad eléctrica y térmica del pack completo, así como de los componentes y módulos.

El cumplimiento de la norma UL 2580 es considerado como una referencia de que la batería ha sido sometida a pruebas exhaustivas que minimizan la probabilidad de fallas peligrosas durante la operación vehicular real. (Underwriters Laboratories, 2020).

2.5.4 ISO 26262: Seguridad funcional en vehículos

La norma ISO 26262 es un estándar de seguridad funcional específico para sistemas eléctricos y electrónicos dentro de vehículos de carretera adaptado a la industria automotriz.

El objetivo de esta norma es “identificar peligros, analizar riesgos y aplicar medidas de control para disminuir fallas que puedan causar consecuencias peligrosas”. (International Organization for Standardization, 2018). Esta norma cubre todo el ciclo de vida del sistema, desde la definición del concepto de seguridad hasta el desarrollo hardware/software, verificación, validación, producción y mantenimiento. Incluye análisis de riesgos (HARA) y la asignación de niveles ASIL

(Automotive Safety Integrity Levels) basados en la severidad, probabilidad de ocurrencia y capacidad de control del conductor ante fallas consideradas en su análisis de riesgo.

Esta norma es particularmente importante para sistemas como el Battery Management System (BMS) y el conjunto de baterías en vehículos eléctricos, ya que obliga a que los diseñadores consideren fallas de componentes críticos, su impacto en la seguridad y a diseñar requisitos que minimicen esos riesgos. Por ello, modos de falla que afecten funciones de protección y monitoreo de la batería pueden clasificarse con alta severidad por su impacto en la seguridad funcional, tal como exige ISO 26262. (International Organization for Standardization, 2018).

2.5.5 IEC 62619: Safety requirements for secondary lithium batteries for industrial applications

La IEC 62619 es una norma internacional que especifica requisitos de seguridad para pilas y baterías secundarias de litio que se utilizan en aplicaciones industriales, incluyendo instalaciones estacionarias, sistemas UPS, carros de golf, carretillas elevadoras y otros sistemas de energía de gran escala. Esta norma se centra en condiciones de uso y abuso que pueden ocurrir en entornos industriales y asegura que las baterías sean seguras bajo esas condiciones. (International Electrotechnical Commission, 2017).

Define ensayos eléctricos, mecánicos, térmicos y de abuso (como cortocircuitos internos y externos, pruebas de impacto, sobrecarga y descarga forzada) que las baterías deben superar antes de ser certificadas. Los requisitos de IEC 62619 ayudan a prevenir fallas peligrosas que pueden resultar de condiciones extremas o mal uso razonablemente previsible, por lo que las fallas asociadas con temas como cortocircuitos, mal ensamblaje de módulos o aislamiento deficiente se consideran de alta severidad si el producto no cumple estos criterios.

2.6 Sistema de Gestión de Baterías (BMS)

El Sistema de Gestión de Baterías, conocido como BMS por sus siglas en inglés (Battery Management System), es un componente electrónico muy importante para garantizar la seguridad, el rendimiento y la vida útil de los arreglos de celdas en un “pack de batería”. De acuerdo con Wang et al. (2021), el BMS es considerado el “ama de llaves” de la batería, cuya función principal es monitorear el estado operativo en tiempo real, prolongar la vida útil del sistema y asegurar que la energía se gestione de manera eficiente y segura.

La integración de un Sistema de Gestión de Baterías eficiente se ha convertido en un requisito obligatorio, ya que los riesgos asociados a los sistemas de almacenamiento de iones de litio requieren estrategias de mitigación en tiempo real (Wang et al., 2021).

2.6.1 Funciones críticas y control del BMS

Los BMS actuales no se limitan a la protección pasiva, sino que ejecutan estrategias de control activo. Las funciones principales de estos sistemas se dividen en tres partes:

1. Estimación de estados de la batería: El cálculo preciso del Estado de Carga (SOC) y el Estado de Salud de la batería (SOH). Esto es vital para evitar el agotamiento prematuro de las celdas y optimizar la energía entregada.
2. Monitoreo de parámetros: Medición constante de voltaje, corriente y temperatura para poder detectar anomalías tempranas.
3. Ecualización o balanceo: La gestión de las diferencias de carga entre celdas individuales para prevenir que una celda alcance su límite de voltaje antes que las demás (Rosen y Farsi, 2023).

2.6.2 Diseño y arquitectura del Sistema de Gestión de Baterías (BMS)

El diseño de un sistema implica una integración que abarca aspectos eléctricos, mecánicos y térmicos. Rosen y Farsi (2023) hablan sobre el diseño que considera la disposición física de las celdas en el paquete y la posible interferencia con otros subsistemas, tal como se muestra en la Ilustración 7.

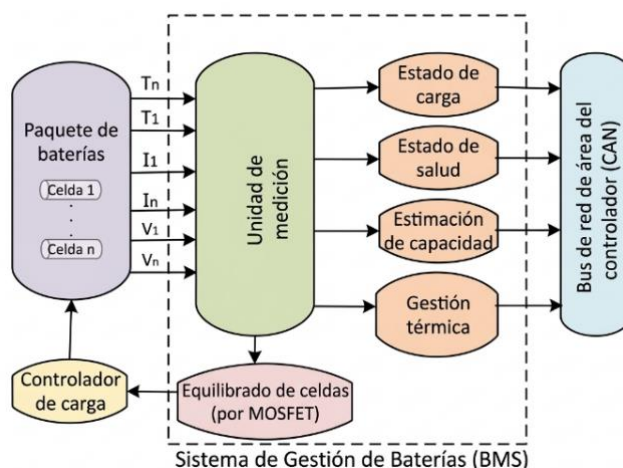


Ilustración 7: Sistema de gestión de baterías (BMS) acoplado a un paquete de baterías en un vehículo eléctrico (Rosen y Farsi,2023).

A nivel de hardware, un BMS cuenta con un microcontrolador central, circuitos integrados de medición, derivadores de corriente, contactores de potencia, resistencias. Una arquitectura bien diseñada permite optimizar la densidad energética y garantizar que la operación sea confiable bajo diversas condiciones de carga, descarga y almacenamiento de la batería.

2.6.3 Parámetros del BMS y curva de descarga de la química LiFePO_4

El diseño y los algoritmos deben estar estrictamente ajustados a la química específica de la batería. En este proyecto se utilizan celdas de litio ferrofosfato (LiFePO_4), las cuales destacan por su alta estabilidad térmica, pero presentan un reto algorítmico particular: su curva de descarga es plana durante sus ciclos. A diferencia de otras baterías, en las que el voltaje cae gradualmente, una celda LiFePO_4 mantiene un voltaje nominal cercano a 3.2V durante casi el 80% de su ciclo, cayendo solo al final, tal como se muestra en la Ilustración 8. Zhang et al. (2023) explica que este comportamiento hace que los métodos tradicionales de

estimación de SOC basados puramente en voltaje sean ineficaces y propensos a grandes errores.

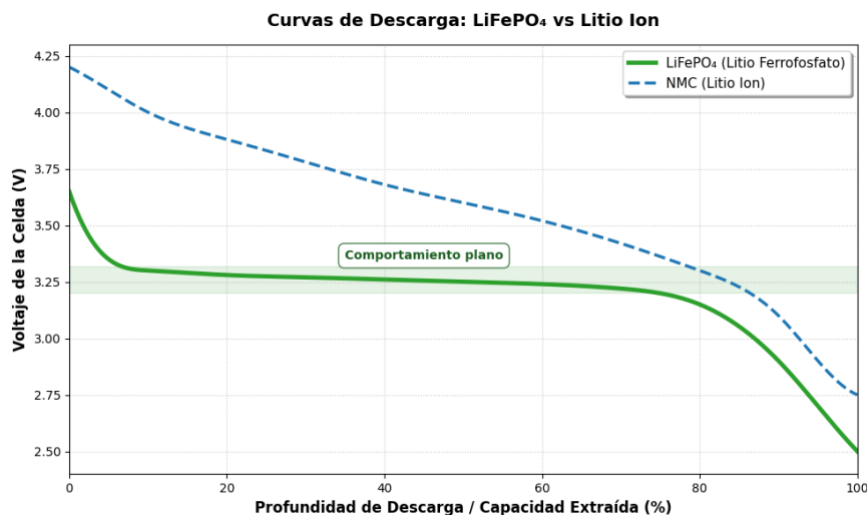


Ilustración 8: Curva de descarga LiFePO₄ vs Litio Ion. Elaboración propia

Por ello, el BMS para LiFePO₄ requiere métodos de control muy específicos, como la integración de los límites operativos estrictos de la química LiFePO₄, cortes por sobredescarga a los 2.5V y un corte por sobrecarga a los 3.65V por celda.

2.6.4 Defectos de manufactura de baterías en las fallas del Sistema de Gestión de Baterías (BMS)

La seguridad es lo más crítico en la tecnología de las baterías de litio. Aunque el LiFePO₄ es una química resistente a fugas térmicas o explosiones, no está exenta de riesgos. Basado en las revisiones de Lv et al. (2023) y los estudios de fallas de ensamblaje, se identifican los siguientes defectos críticos que se pueden presentar fallas en el BMS:

- Fallas de conexión y cortocircuitos internos: Una soldadura deficiente entre módulos puede generar alta resistencia de contacto. Esto produce puntos calientes localizados que pueden derretir el aislamiento antes de que los sensores de temperatura del BMS puedan detectarlo a tiempo.
- Errores de parámetros y ensamble de BMS: Un error humano al configurar el BMS puede provocar que el sistema no detecte cuándo la batería baja de los

2.5 V. Drenar una celda de litio por debajo de este umbral genera la disolución del cobre interno, lo que puede causar un cortocircuito interno o que simplemente deje de funcionar la batería.

- Interferencia y falsos contactos: Un ruteo incorrecto o machucamiento de los cables balanceadores envía señales erróneas (ej. "0 Volts"). El BMS interpretará esto como una falla crítica y bloqueará el sistema, generando rechazos de calidad o falsos positivos.

En conclusión, el BMS actúa como la primera línea de defensa, pero no puede compensar un ensamble físico defectuoso. Es por esto que la estandarización del proceso productivo, el control del cableado y la validación de la soldadura son etapas imperativas para garantizar la viabilidad del producto final.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Metodología general de la investigación

Etapas 1: Diagnóstico inicial

- Recopilación de información del proceso actual, observación directa.

Etapas 2: Análisis de calidad

- Aplicación de herramientas como AMEF, diagrama de Ishikawa, Pareto de defectos.

Etapas 3: Diseño del sistema de calidad

- Elaboración de lista de chequeos, hojas de inspección, procedimientos estandarizados, Desarrollo de sistema de trazabilidad y base de datos de control de celdas que permita el monitoreo de parámetros eléctricos desde la recepción hasta el producto final, elaboración de KPIs.

Etapas 4: Implementación piloto

- Prueba del sistema en una o varias órdenes de producción.

Etapas 5: Resultados y análisis

- Medición de indicadores de desempeño antes y después de la implementación.

Etapas 6: Conclusiones

Recomendaciones y mejoras sugeridas para la empresa.

3.2 Diagnóstico del proceso actual

3.2.1 Descripción general del proceso de ensamble de baterías

El proceso de ensamble de baterías de litio ferrofosfato (LiFePO_4) de la empresa ensambladora de baterías se lleva a cabo en el área de producción bajo la supervisión directa del departamento de calidad. Dicho proceso tiene como finalidad integrar los distintos componentes eléctricos y mecánicos del producto final.

Actualmente, el ensamble se realiza con procedimientos definidos de forma empírica por el personal operativo, sin contar aún con documentación estandarizada ni registros formales de control en el proceso. Esta situación ha generado variabilidad en la calidad del producto, tiempos de retrabajo y dificultades para la trazabilidad de cada unidad fabricada.

El proceso puede describirse en las siguientes etapas:

- Recepción e inspección de materiales.

Se verifican visualmente las celdas, BMS, conectores y carcasa de la batería.

- Preparación de celdas

Se prueban funcionalmente las celdas para verificar que cumplan demanda de corriente y voltaje

- Preparación de módulos de celdas.

Se organizan y conectan las celdas en serie y paralelo según el diseño eléctrico.

- Conexión de BMS y cableado.

Se integran los sistemas de gestión de batería y cableado principal.

- Programación de sistema BMS

Se programan valores a los que funcionará el sistema para proteger y monitorear el comportamiento de las series que conforman el arreglo de la batería.

- Forrado de batería

Se forra banco de batería con plástico termoformable para aislar todo el sistema y proteger de agentes como polvo y humedad.

- Ensamble mecánico y sellado.

Se instalan los módulos en la carcasa y se sellan para evitar la contaminación del exterior como agua, polvo y humedad.

- Pruebas eléctricas y funcionales.

Se verifican voltajes, balanceo, comunicación del BMS y seguridad.

- Etiquetado y liberación del producto.

El área de calidad valida los resultados y autoriza la salida del producto terminado.

Con base en el análisis descriptivo de las etapas presentes en el proceso de ensamble de baterías, se muestra a continuación en la Ilustración 9, el flujograma del proceso de ensamble, donde se puede observar la estructura actual y las necesidades de control en cada una de sus etapas.

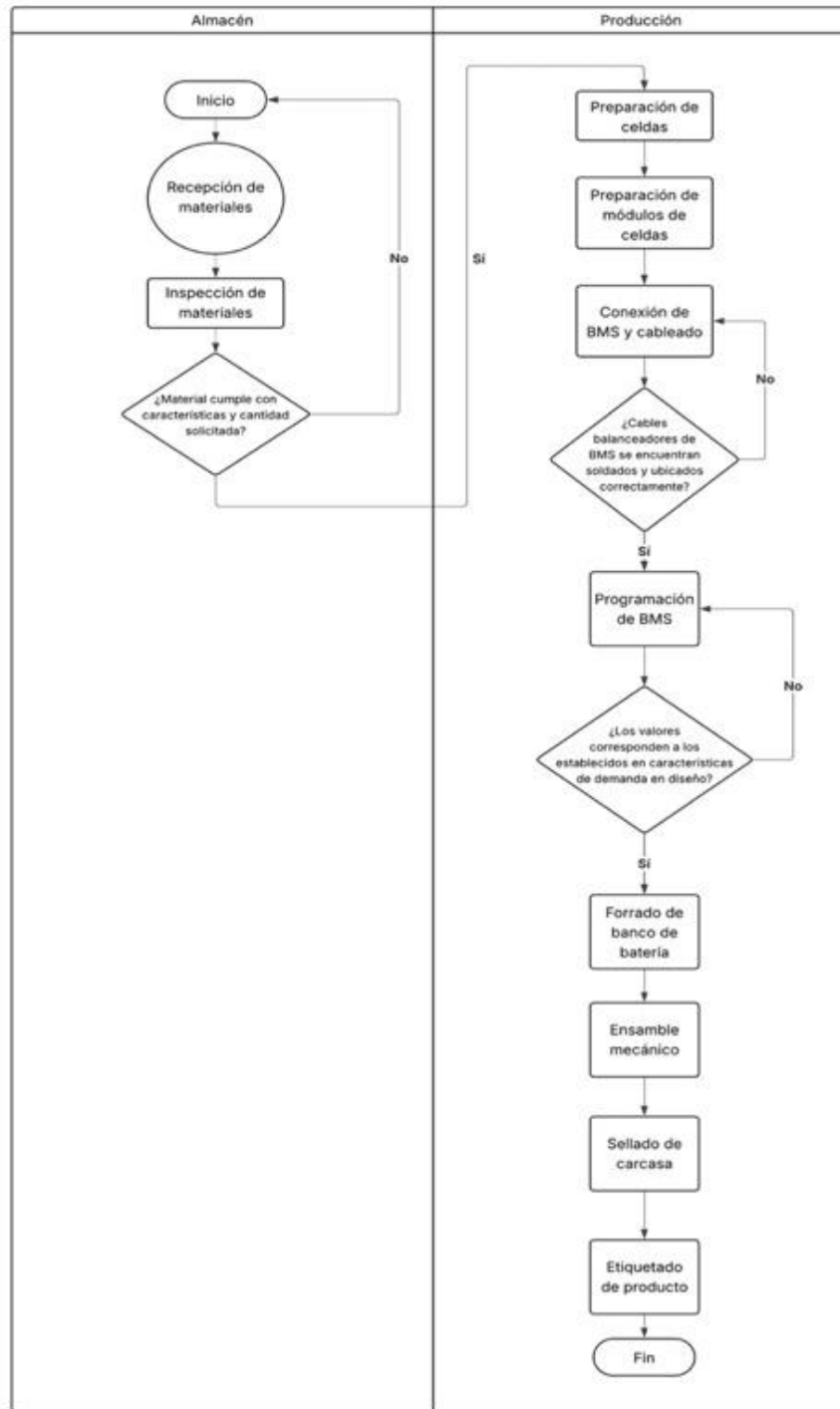


Ilustración 9: Flujograma de proceso actual de ensamble de baterías. Elaboración propia

El proceso actual presenta una estructura lineal y dependiente de la intervención manual del personal, lo cual incrementa la posibilidad de variaciones y errores humanos.

3.2.2 Análisis SIPOC de proceso actual

El siguiente análisis SIPOC busca entender las entradas y salidas en el proceso de ensamble de baterías, para poder facilitar que puntos pueden encontrarse como críticos y los impactos que existen relacionados con la calidad del producto final.

En la Tabla 1 se muestra el análisis SIPOC del proceso actual de ensamble de baterías de litio en la empresa.

Tabla 1: Análisis SIPOC de proceso actual de ensamble de baterías. Elaboración propia.

Proveedor	Entradas	Proceso	Salidas	Cliente
Proveedores externos: fabricantes de celdas, proveedores de BMS, distribuidores de cableado, proveedores de carcasas y material aislante	Celdas de litio, BMS, conectores, cableado, carcasas, estaño, plástico termoformable	Ensamble de baterías de litio (LiFePO ₄)	Baterías ensambladas y probadas	Clientes internos: Calidad, Logística, Ingeniería, Área comercial Clientes externos: Usuarios finales, distribuidores
Planos eléctricos, diagramas de conexión, instructivos preliminares, herramientas, equipo de medición, EPP	Planos eléctricos y mecánicos	Actividades realizadas en estaciones de trabajo por operarios de producción y supervisores de calidad	Información técnica del producto, datos de prueba, producto conforme	Clientes internos: Calidad, Logística, Ingeniería, Área comercial Clientes externos: Usuarios finales, distribuidores

Del análisis SIPOC se identifican los siguientes puntos clave:

1. Dependencia de proveedores externos críticos

Las entradas más importantes (celdas, BMS y conectores) provienen de proveedores externos, lo cual hace indispensable mejorar lo siguiente:

- Inspección de recepción.
- Criterios de aceptación.
- Registro de no conformidades por proveedores.

Esto impacta directamente la calidad del producto final.

2. Necesidad de mayor formalización interna

Las áreas internas de ingeniería, diseño y calidad necesitan documentación técnica e instructivos estandarizados para evitar variaciones en el proceso.

3. El proceso actualmente depende de la operación manual

La mayor parte del ensamble requiere de la intervención humana, lo que incrementa el riesgo de:

- Variaciones.
- Errores de conexión.
- Falta de repetibilidad.

4. La salida del proceso afecta a múltiples clientes internos

El producto final se entrega al cliente externo y de manera interna abastece a los siguientes departamentos:

- Calidad (para inspección final).
- Logística (para embalaje y envío).
- Área comercial (para entrega a clientes).

Esto muestra la necesidad de mejorar la coordinación interdepartamental.

5. La falta de trazabilidad estructurada limita el análisis de fallas

El proceso genera información de pruebas y voltajes, pero actualmente:

- No se registra de manera estandarizada.
- No se utiliza para análisis estadístico.

Esto limita la capacidad de prevención de defectos.

En general, con el análisis SIPOC se revela que la empresa necesita formalizar, documentar y controlar más estrictamente el proceso para garantizar la calidad y la replicabilidad del ensamble de baterías.

3.2.3 Diagrama de Pareto sobre defectos más frecuentes

Se realizó un análisis de defectos frecuentes en el proceso de producción de baterías durante un periodo establecido de 6 meses comprendido del 1 de abril de 2025 al 1 de septiembre de 2025. En la Tabla 2 se muestra el análisis de defectos presentados en proceso de ensamble de baterías:

Tabla 2: Análisis de defectos presentados en proceso de ensamble de baterías (1 de abril-1 septiembre 2025). Elaboración propia.

Tipo de defecto	Frecuencia
Falla en BMS	10
Cableado incorrecto o suelto	7
Soldadura fría	85
Desbalanceo de celdas	20
Celda dañada	1
Corto circuito en conexión de celdas	4
Conexión de BMS errónea	1
Error de configuración de BMS	1

Para simplificar los defectos en el diagrama de Pareto, se generaron diferentes Tablas con sus respectivas agrupaciones de defectos por categorías técnicas, las cuales se dividieron en: fallas eléctricas, fallas de ensamble o unión y fallas relacionadas con celdas.

Cada agrupación por categoría técnica cuenta con su número individual de defectos y al final se hace una sumatoria general por cada agrupación, para facilitar el análisis del diagrama de Pareto. Dicha información se muestra en la Tabla 3, 4 y 5.

Tabla 3: Agrupación por categoría técnica de defectos (A). Elaboración propia.

A. Fallas eléctricas	
Falla en BMS	10
Conexión de BMS errónea	5
Error de configuración de BMS	1
Cableado incorrecto o suelto	7
Corto circuito en conexión de celdas	8
TOTAL DE CATEGORÍA	31

Tabla 4: Agrupación por categoría técnica de defectos (B). Elaboración propia.

B. Fallas de ensamble o unión	
Soldadura fría	25
TOTAL DE CATEGORÍA	25

Tabla 5: Agrupación por categoría técnica de defectos (C). Elaboración propia.

C. Fallas relacionadas con celdas	
Desbalanceo de celdas	20
Celdas dañadas	1
TOTAL DE CATEGORÍA	21

En la Tabla 6 se muestran los datos consolidados referentes a los defectos totales por categoría técnica, su porcentaje calculado y el porcentaje acumulado por categoría.

Tabla 6: Tabla consolidada de defectos por categoría técnica. Elaboración propia

Categoría técnica	Total de defectos	Porcentaje %	Porcentaje acumulado %
Fallas eléctricas	31	40.26%	40.26%
Fallas de ensamble o unión	25	32.46%	72.72%
Fallas relacionadas con celdas	21	27.28%	100%
TOTAL	77	100%	100%

Después de generar en análisis, se puede observar que las fallas eléctricas representan gran parte de los problemas (40,26 %). Esto indica que el punto crítico del proceso está en:

- Ensamble del BMS
- Cableado

- Conexiones entre celdas (Ensamble de celdas en módulos)

Estas áreas deberían ser las prioridades de acción, así como poner atención en problemas relacionados con celdas.

Las fallas relacionadas con celdas representan el 27,28 %. Involucran problemas de calidad del proveedor o falta de pruebas internas.

Las fallas de ensamble representan el 32,46 %. Esto apunta al proceso de soldadura, capacitación, estandarización o mantenimiento del equipo.

Para visualizar el comportamiento de estas variables y facilitar su análisis, la Ilustración 10 muestra el diagrama de Pareto con la frecuencia de los defectos organizados por categoría técnica.

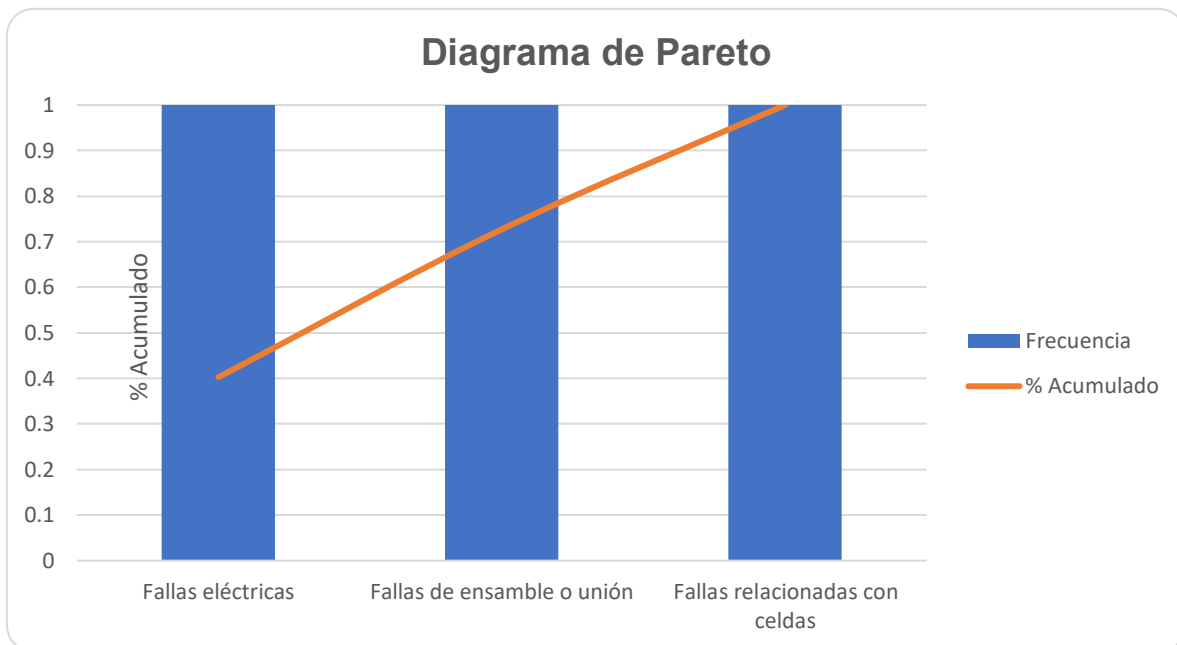


Ilustración 10: Diagrama de Pareto de defectos más frecuentes en ensamble de baterías LiFePO₄. Elaboración propia.

3.2.4 Identificación de puntos críticos de calidad

La identificación de puntos críticos de calidad (PCC) dentro del proceso de ensamble de baterías de LiFePO_4 es fundamental para orientar los esfuerzos de control, mitigación de riesgos y mejora continua.

Un punto crítico de calidad se define como cualquier etapa, actividad o característica del proceso cuya variabilidad pueda generar defectos con impacto significativo en:

- Seguridad para el usuario.
- Confiabilidad de la batería.
- Desempeño eléctrico.
- Durabilidad estructural.
- Funcionamiento del sistema BMS y del conjunto de batería.

Con base en los análisis previos, se identifican los puntos del proceso donde la probabilidad de falla y/o la severidad de las consecuencias es mayor y, por tanto, requieren control. Para identificar y organizar las posibles causas raíz de los defectos prioritarios detectados previamente en el análisis de Pareto, se desarrolló un diagrama de Ishikawa.

La aplicación de esta herramienta, fundamentada en la estructura de las 6M (Método, Mano de Obra, Maquinaria, Materiales, Medición y Medio Ambiente), permite justificar técnica y objetivamente los puntos críticos de calidad del proceso. El resultado de este análisis se expone en la Ilustración 11.

Defectos en ensamble de baterías



Ilustración 11: Diagrama Ishikawa de defectos en ensamble de baterías. Elaboración propia.

Para estructurar el análisis de las fallas detectadas, la Tabla 7 expone de manera consolidada las posibles causas que generan defectos durante el proceso de ensamble de las baterías.

Tabla 7: Tabla consolidada de posibles causas en defectos en el proceso de ensamble de baterías. Elaboración propia.

Criterio	Posibles causas identificadas	Relación con defectos de diagrama de Pareto
Método	- Ausencia de procedimientos estandarizados para ensamble de BMS - Instrucciones de trabajo incompletas o no actualizadas - Secuencia incorrecta de conexión de módulos y cableado - Falta de puntos de verificación intermedios durante el proceso	- Falla en BMS - Conexión errónea de BMS - Error de configuración de BMS - Cableado incorrecto

	• Configuración del BMS realizada sin listas de chequeo validadas	
Mano de obra	• Capacitación técnica insuficiente en electrónica • Dependencia del criterio individual del operador • Fatiga • Omisión de revisiones por presión de tiempo	• Soldadura fría, • Cableado suelto, • Conexión incorrecta de celdas • Errores de ensamble.
Maquinaria	• Herramientas manuales inadecuadas o desgastadas • Falta de dispositivos poka-yoke para evitar conexiones incorrectas	• Soldadura fría • Corto circuito en conexión de celdas • Fallas eléctricas
Materiales	• Cables sin especificación estandarizada • Aislantes eléctricos insuficientes o mal aplicados • Inexistencia de clasificación de celdas	• Desbalanceo de celdas • Corto circuito • Cableado defectuoso
Medición	• Inspección visual como principal método de control • Falta de pruebas eléctricas sistemáticas por etapa • Ausencia de registros históricos de defectos por operación • Detección tardía de fallas funcionales del BMS	• Defectos no detectados en origen • Reincidencia de fallas eléctricas • Reincidencia de errores de configuración
Medio ambiente	• Interrupciones durante el proceso productivo	• Errores de conexión • Soldadura deficiente

Los defectos críticos del proceso de ensamble de baterías de litio tienen un origen en diferentes factores. No obstante, se observa que las causas con mayor

incidencia se concentran principalmente en las categorías Método, Mano de Obra y Medición. Las causas asociadas al Método reflejan la ausencia de procedimientos estandarizados, secuencias claramente definidas y listas de verificación para actividades críticas como la configuración del BMS, la conexión de módulos y la integración del cableado. Estas condiciones incrementan la probabilidad de errores operativos y generan variabilidad en el proceso.

En cuanto a la mano de obra, el análisis revela una alta dependencia del criterio del operador, así como brechas en la capacitación técnica. Esto se traduce en defectos como soldadura fría, cableado incorrecto o conexiones erróneas del BMS. La categoría Medición muestra debilidades importantes en los sistemas de detección temprana de fallas, ya que el control del proceso se basa principalmente en inspecciones visuales y pruebas finales, lo que limita la detección de defectos en su punto de origen. Tomando como base los defectos prioritarios identificados en el diagrama de Pareto, se determinaron las etapas operativas que requieren mayor control. La Tabla 8 resume los principales puntos críticos de calidad observados en el proceso de ensamble de baterías.

Tabla 8: Tabla resumen de puntos críticos de calidad observados en el proceso de ensamble de baterías. Elaboración propia.

Proceso	Punto Crítico	Riesgo principal	Consecuencia potencial	Tipo de control requerido
Ensamble de BMS	Integración electrónica	Falla funcional	Sobrecalentamiento, bloqueo de BMS	Pruebas funcionales, inspección visual, inspección eléctrica
Conexión de módulos de celdas	Unión de celdas y módulos con tiras de níquel	Alto amperaje en conexiones	Calentamiento, corto circuito	Control de cálculo de número de tiras de níquel ensambladas Control de espesor de láminas de níquel ensambladas
Integración de cableado	Punto de soldadura	Soldadura fría o excesiva	Corto circuito, caída de voltaje, daño en BMS	Inspección visual de orden de cableado Inspección funcional de orden de

				cableado mediante sumatoria de voltajes Inspección física de soldadura
Preparación de celdas	Fallas funcionales y/o físicas de celdas	Funcionamiento insuficiente, fallas tempranas de producto	Sobrecalentamiento, desbalanceo de pack de batería	Inspección visual Inspección funcional
Aislamiento y protección	Aplicación de materiales aislantes	Aislamiento insuficiente	Riesgo eléctrico, corto circuito	Inspección visual, lista de chequeo
Ensamble mecánico y sellado final	Cierre de pack de batería, inmovilización de batería dentro del pack	Vibraciones internas	Daño de batería	Inspección visual, lista de chequeo

3.2.5 Diseño de matriz de criticidad para puntos críticos de calidad en proceso de ensamble de baterías

La matriz de criticidad se elaboró con base en la metodología del Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF), la cual permite evaluar de manera sistemática los riesgos asociados a los puntos críticos de calidad identificados en el proceso de ensamble de baterías de litio. Cada punto crítico fue evaluado mediante tres criterios fundamentales:

- Severidad (S): impacto del defecto sobre la seguridad, funcionalidad y confiabilidad del producto.
- Ocurrencia (O): probabilidad de que el defecto se presente durante el proceso.
- Detección (D): capacidad actual del sistema para detectar el defecto antes de que el producto llegue al cliente.

La combinación de estos tres factores genera el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), calculado como:

$$NPR = S \times O \times D$$

Este valor permite priorizar los puntos del proceso que requieren atención inmediata.

Severidad

La asignación de los valores de severidad se fundamentó en normas internacionales de seguridad eléctrica, riesgo térmico y confiabilidad funcional de baterías de litio, tales como **IEC 62133-2**, **UL 2580**, **ISO 26262** e **IEC 62619**, las cuales establecen criterios para la clasificación de fallas críticas asociadas a riesgos de incendio, sobrecalentamiento, cortocircuitos y pérdida de funciones de protección.

Para cuantificar el impacto de cada modo de falla, la Tabla 9 establece la relación de valores de severidad.

Tabla 9: Tabla de relación de valores de severidad. Elaboración propia.

Nivel de severidad	Interpretación
10	Falla de crítica de alto riesgo
9	Falla grave con alto riesgo
8	Falla funcional mayor
7	Falla funcional alta
6	Falla funcional moderada alta
5	Falla funcional media

La evaluación y valores se asignaron con respecto a análisis previos de defectos observado en el análisis de Pareto y análisis del proceso actual tomando en cuenta los siguientes puntos:

- Nivel de estandarización del proceso.
- Capacidad de los controles actuales.
- Dependencia del factor humano.
- Nivel de automatización y documentación existente.

Ocurrencia

La ocurrencia representa la probabilidad de que una causa específica genere un modo de falla durante el proceso de ensamble, considerando la estabilidad y madurez del proceso; la Tabla 10 establece la relación de los valores de ocurrencia utilizados en este análisis.

Tabla 10: Tabla de relación de valores de ocurrencia. Elaboración propia.

Valor	Interpretación
1-2	Rara vez, altamente controlado
3-4	Falla ocasional, controles definidos
5-6	Falla moderada, dependencia del operador
7-8	Falla frecuente, proceso inestable
9-10	Falla muy frecuente, no hay control

Detección

La detección mide la capacidad del sistema actual para identificar una falla o su causa raíz antes de que el producto avance a la siguiente etapa operativa o llegue al usuario final; la Tabla 11 presenta la relación de los valores de detección aplicables al proceso de ensamble de baterías.

Tabla 11: Tabla de relación de valores de detección. Elaboración propia.

Valor	Interpretación
1-2	Detección inmediata y documentada
3-4	Inspección confiable y documentada
5-6	Inspección moderada dependencia del operador
7-8	Detección tardía
9-10	No existe detección

La Tabla 12 expone la matriz de criticidad, donde se consolida el análisis de severidad, ocurrencia y detección junto con el cálculo resultante del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) para determinar las áreas de acción prioritaria.

Tabla 12: Matriz de puntos críticos de calidad en proceso de ensamble de batería.
Elaboración propia.

Punto crítico	Severidad	Ocurrencia	Detección	SxOxD	Nivel de riesgo
Integración electrónica de BMS	9	5	5	225	Alto
Unión de celdas y módulos con tiras de níquel	9	6	6	378	Muy Alto
Punto de soldadura en integración de cableado	8	5	6	280	Alto
Fallas funcionales y/o físicas de celdas	9	6	6	324	Alto
Aplicación de materiales aislantes	9	6	5	90	Medio
Cierre de pack de batería, inmovilización de batería dentro del pack	5	6	5	40	Bajo

- El punto más crítico es la conexión de módulos de celdas, debido a su alta severidad y detección dependiente del operador.
- Las fallas funcionales y/o físicas de celdas, el ensamble del BMS y la integración del cableado son procesos de riesgo alto por el potencial de fallas eléctricas funcionales.
- El aislamiento presenta severidad media, pero buena detectabilidad.
- El cierre de pack de batería representa un riesgo bajo, pero es importante para la confiabilidad del producto.

Asignación de valores en matriz de criticidad

La asignación de valores de severidad, ocurrencia y detección se realizó de la siguiente forma:

- Alta Severidad ($S \geq 8$)

Motivo: fallas que representan un impacto en seguridad eléctrica y térmica.

- Ocurrencia media alta (O = 5–6)

Motivo: procesos manuales con variabilidad.

- Detección limitada (D = 5–6)

Motivo: inspección visual y pruebas no automatizadas, alta dependencia de la inspección y del juicio del operador de forma individual. Estos valores generan NPR elevados, lo cual muestra la necesidad de acciones correctivas y preventivas como:

- Estandarización del proceso.
- Puntos de control y documentación.
- Mejora de pruebas eléctricas.
- Capacitación y métodos visuales.

La Tabla 13 presenta el Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) desarrollado con el formato comúnmente utilizado para este análisis, consolidando las ponderaciones de severidad (S), ocurrencia (O) y detección (D) analizadas anteriormente, además de las detecciones de falla analizadas para el proceso actual de ensamble de baterías.

Al analizar los resultados, se determinó que la acción prioritaria debe enfocarse en la conexión de módulos de celdas, la cual arrojó el riesgo más crítico con un NPR de 378. Este alto valor se debe a la combinación de una severidad extrema (S=9, por riesgo de cortocircuito o sobrecalentamiento) y una alta ocurrencia (O=7) derivada de procedimientos empíricos.

En segundo nivel de criticidad se encuentra la integración de cableado (NPR de 280). Aunque su ocurrencia es moderada, la dificultad visual para detectar errores en la integración de los cables o ruteos incorrectos (D=7) eleva el riesgo. En este caso, la estrategia de control exige la creación de diagramas de ruteo específicos y listas de chequeo. Le sigue el ensamble del Sistema de Gestión de Baterías (BMS), con un NPR de 225.

Dado que una mala parametrización puede causar daño irreversible a las celdas y en los BMS (S=9), se determinó que la prueba funcional empírica actual es insuficiente, por lo que se requiere implementar listas de chequeo de voltajes, ayudas visuales de ensamble y conexiones del BMS, etc.

Finalmente, se identificaron riesgos de menor impacto en los procesos de aislamiento y protección (NPR de 90) y empaque final (NPR de 40). Aunque la colocación de aislante tiene una severidad alta, su facilidad de detección visual mantiene el riesgo controlado; de igual forma, el sellado final presenta un riesgo bajo. Para ambos casos, las acciones recomendadas se centran en la documentación del estándar y la validación mediante listas de chequeo antes de la liberación del producto.

Tabla 13: Formato consolidado de análisis AMEF. Elaboración propia.

Descripción de la falla	Modos potenciales	Efecto potencial de fallo	Severidad (S)	Causas potenciales	Ocurrencia (O)	Validación y/o control	Detección (D)	NPR	Acciones recomendadas	Áreas/ Personas responsables
Problemas de integración electrónica de BMS	Conexión incorrecta de BMS (Proceso de ensamble de BMS)	Falla funcional de BMS	9	Proceso no estandarizado para ensamble de BMS	5	Inspección moderada dependencia del operador	5	225	Pruebas funcionales Inspección visual Inspección eléctrica Estandarización de proceso	Departamento de calidad Inspector de calidad Personal operativo
Errores en unión de celdas y módulos con tiras de níquel	Corto circuito en unión de celdas Sumatoria incorrecta de voltaje total en pack de batería (Proceso de conexión de módulos de celdas)	Alto amperaje en conexiones (calentamientos , corto circuito)	9	Secuencia de conexión incorrecta Omisión de revisiones por presión de tiempo Dependencia de criterio del operador Diseño CAD de pack de batería	6	Inspección moderada dependencia del operador	6	378	Control de cálculo de número de tiras de níquel ensambladas Control de espesor de láminas de níquel ensambladas Diseño CAD de ensamble de pack de batería Estandarización de proceso	Departamento de calidad Departamento de ingeniería (Diseño) Inspector de calidad Personal operativo
Problemas en punto de soldadura en integración de cableado	Proceso de integración de cableado	Soldadura fría o excesiva	8	Falta de verificación de puntos de ensamble Cableado sin especificación estandarizada Dependencia de criterio del operador Técnicas imprecisas	5	Inspección moderada dependencia del operador	6	280	Inspección visual de orden de cableado Inspección funcional de orden de cableado mediante sumatoria de voltajes Inspección física de soldadura Estandarización de proceso	Departamento de calidad Inspector de calidad Personal operativo
Fallas funcionales y/o físicas de celdas	Desbalanceo de celdas (Proceso de preparación de celdas)	Funcionamiento insuficiente, fallas tempranas de producto	9	Falta de proceso de clasificación de celdas Omisión de revisiones por presión de tiempo	6	Inspección moderada dependencia del operador	6	324	Inspección visual Inspección funcional Estandarización de proceso	Departamento de calidad Inspector de calidad Personal operativo
Problemas de calidad en aplicación de materiales aislantes	Proceso de aislamiento y protección	Aislamiento insuficiente, defectos estéticos	9	Aislantes eléctricos mal aplicados	6	Inspección moderada dependencia del operador	5	90	Control visual Lista de chequeo Estandarización de proceso	Departamento de calidad Inspector de calidad Personal operativo
Problemas en confiabilidad en cierre de pack de batería, inmovilización de batería dentro del pack	Proceso de ensamble mecánico y sellado final	Vibraciones internas	5	Capacitación técnica insuficiente	6	Inspección moderada dependencia del operador	5	40	Inspección visual Lista de chequeo Estandarización de proceso	Departamento de calidad Inspector de calidad Personal operativo

3.3 Diseño del sistema propuesto

3.3.1 Proceso: Inspección física de las celdas

El objetivo de este procedimiento es garantizar que las celdas necesarias para la producción de baterías sean inspeccionadas de manera física, contabilizadas y registradas de manera adecuada y precisa. Este procedimiento asegura que las celdas estén disponibles, en las cantidades correctas y en condiciones óptimas antes de iniciar el segundo proceso de inspección relacionado con el funcionamiento de estas, minimizando así retrasos y asegurando la continuidad en los procesos de calidad. En la Tabla 14 se expone el proceso de forma detallada, junto con las unidades que intervienen y las documentaciones necesarias para dicho proceso.

Tabla 14: Proceso de inspección física de celdas. Elaboración propia.

UNIDAD QUE INTERVIENE	ACT.	DESCRIPCIÓN	DOCUMENTO Y CÓDIGO
ALMACEN	1	Contabilizar qué el número de celdas en cada caja sea correcto de acuerdo con el <<Formato de recepción de materiales de almacén>>.	Formato de recepción de materiales de almacén
	2	Registrar el conteo en el <<Formato de registro de no conformidades en celdas LiFePO ₄ >>.	Formato de registro de no conformidades en celdas LiFePO ₄ .
PRODUCCIÓN	1	Hacer una inspección visual de cada celda tomando como referencia: << Formato de ayuda visual de inspección de no conformidades para baterías LiFePO ₄ >>.	Formato de ayuda visual de inspección de no conformidades para baterías LiFePO ₄ .
	2	Retirar de la caja las celdas que no cumplan con los requisitos del << Formato de ayuda visual de inspección de no conformidades para baterías LiFePO ₄ . >>.	Formato de ayuda visual de inspección de no conformidades para baterías LiFePO ₄ .
	3	Registrar el número de celdas de la caja en el << Formato de registro de no conformidades en celdas LiFePO ₄ . >>.	Formato de registro de no conformidades en celdas LiFePO ₄ .
	4	Almacenar las celdas que no hayan cumplido con los requisitos en la caja de celdas no conformes.	

En este proceso se propone tener control documentado y ayudas visuales que proporcionen al operario información valiosa para poder tomar decisiones basadas en los diferentes escenarios que se puedan presentar durante el proceso de inspección física de las celdas. Se propone tener un control de las celdas “no conformes” para conocer de forma precisa el porcentaje de celdas que no cumplen con los estándares iniciales de calidad y tener más organización de las celdas que son aptas para seguir el proceso de ensamble de forma satisfactoria.

Dichos registros se tendrían respaldados y organizados en carpetas físicas y de forma digital, a cargo del departamento de calidad de la empresa ensambladora de baterías. En la Ilustración 12 se muestra el flujograma de proceso antes descrito.

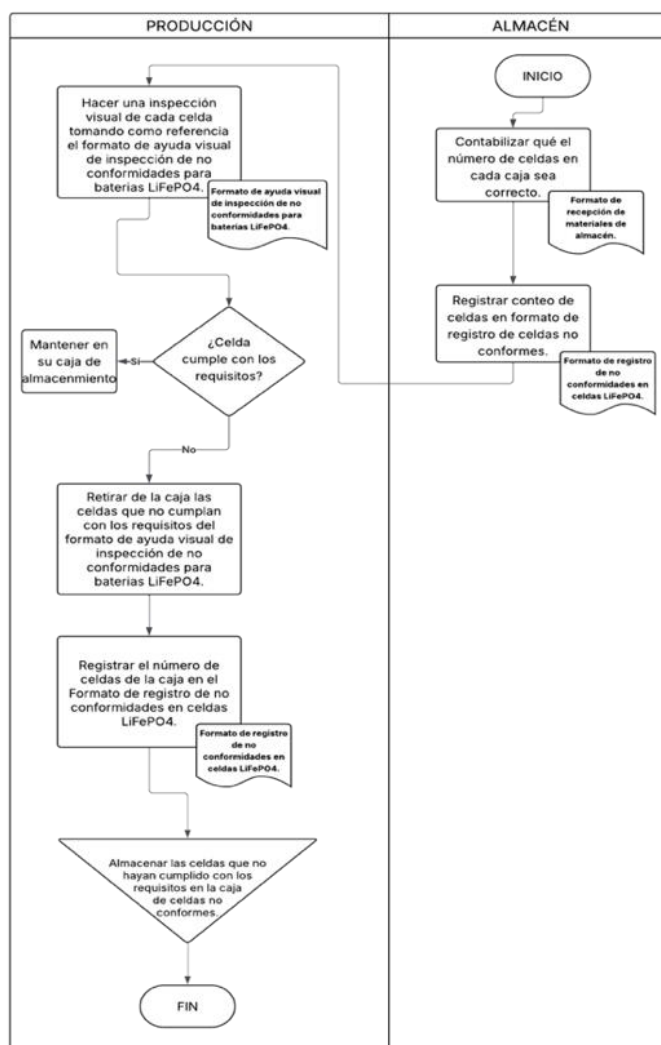


Ilustración 12: Flujograma de proceso: Inspección física de celdas.
Elaboración propia.

Con ayuda del formato de recepción de materiales para almacén, expuesto en la Ilustración 13, se busca tener control de la cantidad de ítems o celdas que se encuentran en cada caja de almacenamiento, este control ayudará al operador a verificar que la cantidad de ítems sea el correcto, de acuerdo a la información que registre el departamento de almacén.

FORMATO DE RECEPCIÓN DE MATERIALES PARA ALMACÉN



Fecha de recepción:
Hora de recepción:

Estado de ITEM		
Bueno	Regular	Malo

Cantidad	Descripción	Estado del ítem	Observaciones

Ilustración 13: Formato de recepción de materiales de almacén. Elaboración propia.

En la información documentada sugerida para este proceso se menciona el formato de registro de no conformidades en celdas LiFePO_4 , el cual se muestra en la Ilustración 14, este formato busca tener control de la fecha en que se presentan las no conformidades en celdas, además de tener un registro del lote, código de identificación de la caja de almacenamiento donde se encuentra la celda defectuosa, cantidad de celdas defectuosas, observaciones y firma del supervisor en turno.

Voltaje mínimo: 2.5 V

[illegible]

Elaboración propia.

La ayuda visual de inspección de no conformidades para baterías LiFePO_4 contiene información referente a los defectos físicos que pueden existir en las celdas, los cuales el operador debe identificar, muestra los límites o señales permisibles, además de las acciones inmediatas que debe hacer el operador en caso de que se encuentren defectos que hagan que la celda sea tomada como “no conforme”.

	AYUDA VISUAL DE INSPECCIÓN DE NO CONFORMIDADES PARA BATERÍAS LiFePO ₄	
	Proceso	Fecha de expedición
	PB-PI-001	20/09/2025
		Código
		PB-PI-001-FAVII001



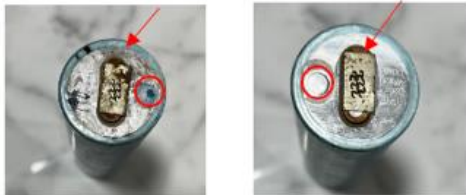
NO CONFORME	CONFORME
Descripción del defecto: Celda de batería presenta señales de daño en válvulas de escape de gases en polo negativo y/o positivo o señales de fuga de electrolito y corrosión en placas conductoras de níquel.	
	
Acción inmediata: Separar el material, colocarlo en el área de material no conforme y avisar al supervisor de producción	
Descripción del defecto: Celda de batería no tiene etiqueta de identificación ni registro en base de datos de control.	
	
Acción inmediata: Separar material y avisar a supervisor de producción	
Descripción de defecto: Celda de batería presenta señales de fuga de electrolito	
	
Acción inmediata: Separar material, colocarlo en el área de material no conforme y avisar a la supervisión de producción.	
Descripción del defecto: Celda de batería presenta daños estructurales como golpes y/o abolladuras	
	
Acción inmediata: Separar material, colocarlo en el área de material no conforme y avisar a la supervisión de producción.	

Ilustración 15: Ayuda visual de inspección de no conformidades para baterías LiFePO₄. Elaboración propia.

3.3.2 Proceso: Inspección funcional de celdas

El objetivo de este proceso es establecer un procedimiento estandarizado para el proceso de inspección del funcionamiento de las celdas. Asegurando que cada una de las celdas cumpla con los estándares de calidad y funcionalidad establecidos por la empresa y poder retirar aquellas que se consideren “celdas no funcionales”.

Los criterios de aceptación definidos para la inspección funcional de celdas se fundamentan en los requisitos de seguridad de la norma **IEC 62133-2** e **IEC 62619**. Estas normativas dictan que cualquier celda con signos de estrés mecánico, deformación o niveles de voltaje fuera del rango nominal debe ser identificada inmediatamente para evitar riesgos de cortocircuito o inestabilidad térmica en etapas posteriores del ensamble.

En la Tabla 15 se expone el proceso de inspección de celdas de forma detallada, junto con las unidades que intervienen y las documentaciones necesarias para dicho proceso.

Tabla 15: Proceso de inspección funcional de celdas. Elaboración propia.

UNIDAD QUE INTERVIENE	ACT.	DESCRIPCIÓN	DOCUMENTO Y CÓDIGO
PRODUCCIÓN	1	Configurar el multímetro para medir el voltaje de las celdas.	
	2	Verificar que la celda esté dentro de los límites permisibles (mayor o igual a 2.5 v).	
	3	Si se considera una celda “no funcional” (menor a 2.5 v) colocar la celda en la caja de “celdas inconformes”.	
	4	Registrar los resultados en el formato <<Formato de registro de celdas no conformes>>.	Formato de registro de no conformidades en celdas LiFePO ₄ .
	5	Si la celda está dentro de los límites permisibles, regresar a su caja de almacenamiento	
	6	Almacenar celdas conformes en su caja	

Como etapa siguiente a la inspección física, se estableció un proceso de revisión funcional para las celdas aprobadas. Esta validación permite confirmar la viabilidad técnica de cada unidad antes de someterla a las pruebas de capacidad energética. Para garantizar la trazabilidad de las desviaciones, se integró un sistema de registro de celdas no conformes que complementa los formatos de control de las fases previas, mismo registro del proceso anterior.

La secuencia de las operaciones y las decisiones de este proceso se detallan en el flujograma de la Ilustración 16.

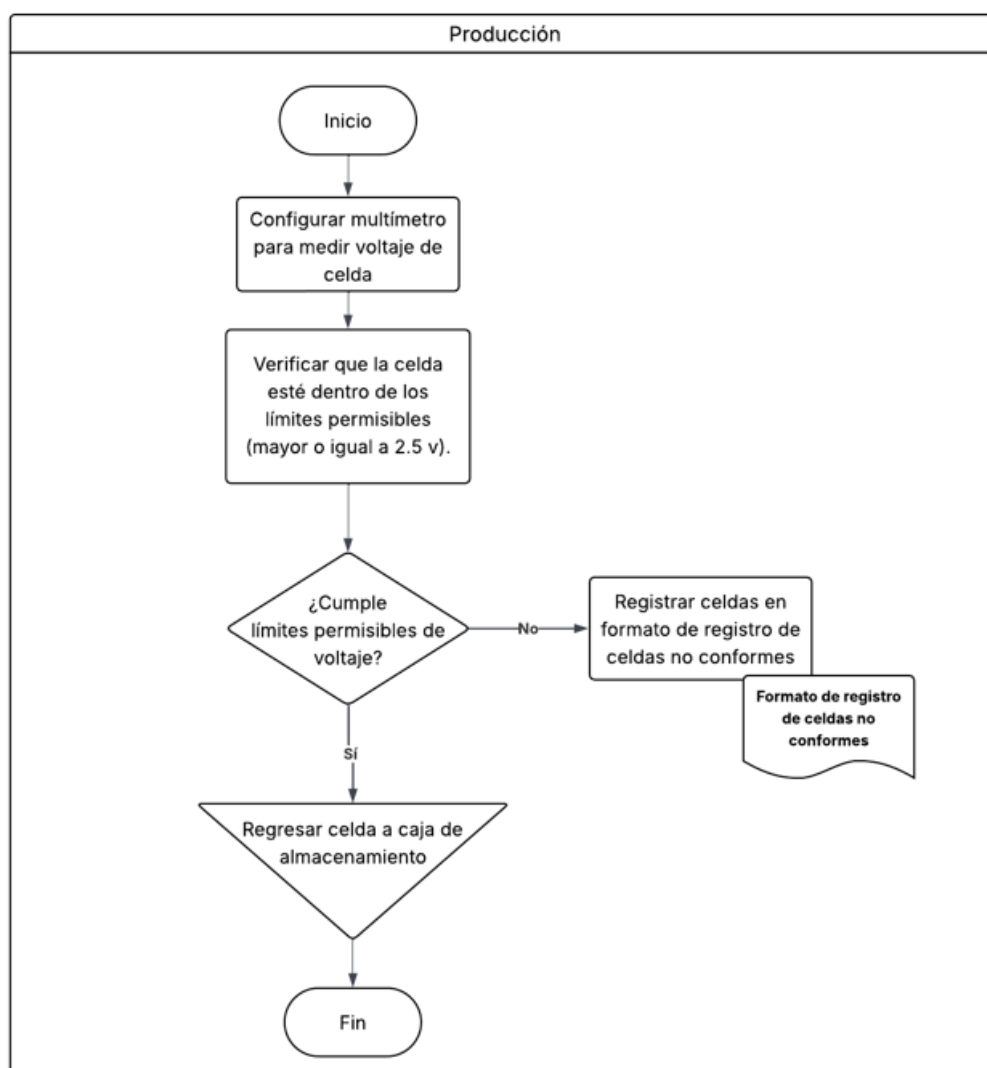


Ilustración 16: Flujograma de proceso de inspección funcional de celdas. Elaboración propia.

3.3.3 Proceso: Carga de celdas

El objetivo de carga de celdas es establecer un procedimiento que garantice que las celdas funcionales sean cargadas de manera adecuada y eficiente asegurando una carga controlada y segura durante el proceso siguiendo los procedimientos establecidos, garantizando la calidad y trazabilidad del producto.

Se sugiere una carga de preparación de celdas para posteriores procesos de prueba.

En la Tabla 16 se expone el proceso de carga de celdas de forma detallada, junto con las unidades que intervienen y las documentaciones necesarias para dicho proceso.

Tabla 16: Proceso de carga de celdas. Elaboración propia.

UNIDAD QUE INTERVIENE	ACT.	DESCRIPCIÓN	DOCUMENTO Y CÓDIGO
PRODUCCIÓN	1	Conectar las celdas conformes al módulo de carga de celdas al voltaje y corriente establecidos.	
	2	Verificar temperatura en celdas durante la carga	
	3	Regresar las celdas a su caja de almacenamiento después de carga.	
	4	Etiquetar las cajas con los siguientes distintivos: << Código de caja>> y << Etiqueta de aceptación>>	Código de caja y etiqueta de aceptación.
ALMACÉN	5	Transportar caja al almacén.	

El control documentado sugerido para este proceso es tener un sistema de trazabilidad para cada caja de almacenamiento y una caja de aceptación en donde el operario y supervisor en turno avalan que aprobaron los estándares de calidad las celdas almacenadas, además, el código de caja y etiqueta de aceptación son medidas de control propuestas para fortalecer el sistema de trazabilidad, siendo posible localizar cada caja de almacenamiento de celdas de forma rápida y precisa, además de tener control de la fecha y del operario que genera inspecciones en las celdas.

Una vez validado el estado funcional, el estándar operativo determina que las celdas aprobadas deben someterse a un ciclo de carga máxima para evaluar su capacidad de retención y su comportamiento durante el suministro de energía.

Concluido este proceso, se establece la validación entre el operador y el supervisor mencionada anteriormente en la etiqueta de aceptación. La secuencia de estas operaciones se detalla en el flujograma de la Ilustración 17.

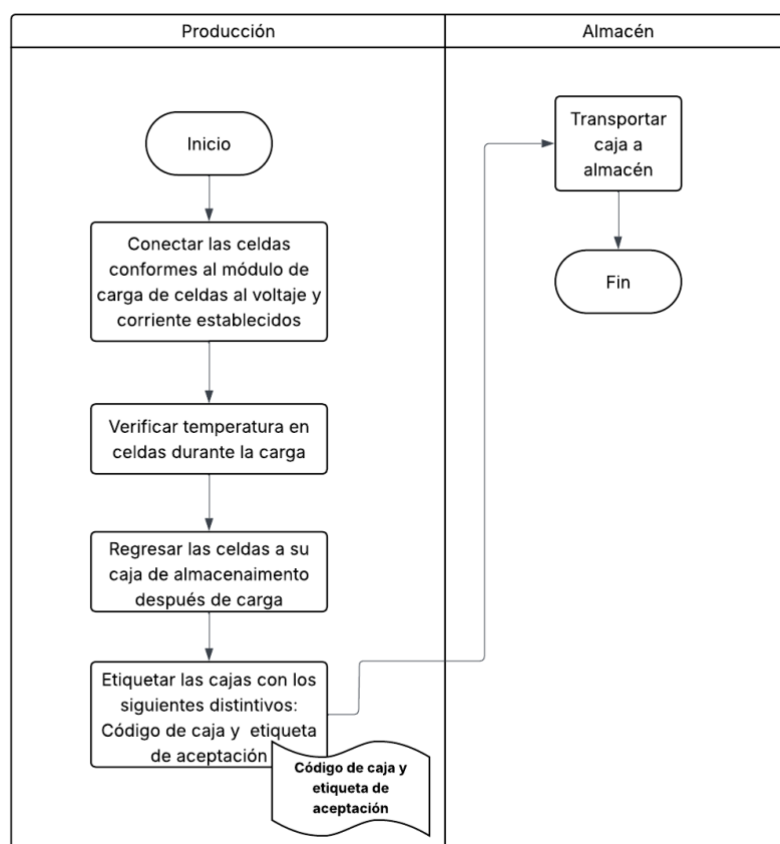


Ilustración 17: Flujograma de proceso de carga de celdas. Elaboración propia.

La Ilustración 18 presenta la estructura del código de caja de almacenamiento, el cual está conformado por el prefijo "TXC" (indicativo de Caja) seguido de un número consecutivo. Esta nomenclatura funciona como clave primaria vinculada a una base de datos en Excel, permitiendo gestionar, monitorear y localizar de manera eficiente la información técnica de las celdas contenidas en cada caja de almacenamiento.

Código de caja.

1. TXC: Caja.
2. Número consecutivo de caja.



Ilustración 18: Código de caja de almacenamiento. Elaboración propia.

Para complementar el sistema de trazabilidad en el almacenamiento de las celdas, se desarrolló una codificación individual a nivel componente.

La Ilustración 19 muestra la estructura de este identificador, el cual se adhiere físicamente a cada celda y está compuesto por un número consecutivo seguido de su modelo específico (por ejemplo, 18650 o 21700). Esta etiqueta garantiza que los valores y características de la batería correspondan exactamente con la clasificación o "familia" asignada a su caja contenedora.

Codificación de celdas:

1. Número consecutivo de celda.
2. Modelo de celda. (ejemplo)
 - 2.1. Modelos de celdas:
 - 18650
 - 21700



Ilustración 19: Codificación de celdas. Elaboración propia.

La Ilustración 20 muestra el formato con el cual se implementará el control de liberación de caja de almacenamiento, el cual se adhiere en el exterior de cada caja de almacenamiento para certificar que las celdas cumplen con las especificaciones técnicas, es decir que soportan el primer proceso crítico el cual es la carga.

Al documentar el nombre del supervisor que aprueba y la fecha de expedición, se garantiza la responsabilidad operativa y la trazabilidad del material liberado.

Etiqueta de aceptación:

1. Supervisor que aprueba.
2. Fecha de expedición.



Ilustración 20: Etiqueta de aceptación de caja de almacenamiento.
Elaboración propia.

3.3.4 Proceso: Descarga de celdas

El objetivo de este proceso es establecer un procedimiento estandarizado para realizar una prueba de descarga controlada de las celdas, verificando su rendimiento y comportamiento eléctricos, asegurando su correcta conexión y funcionamiento, cumpliendo con los estándares de calidad y seguridad establecidos para su etiquetado final.

En la Tabla 17 se expone el proceso de descarga de celdas de forma detallada, junto con las unidades que intervienen y las documentaciones necesarias para dicho proceso.

Tabla 17: Proceso de descarga de celdas. Elaboración propia.

UNIDAD QUE INTERVIENE	ACT.	DESCRIPCIÓN	DOCUMENTO Y CÓDIGO
PRODUCCIÓN	1	Preparar el descargador.	
	2	Conectar celda a descargador	
	3	Inducir descarga controlada durante tiempo establecido “n” minutos	
	4	Registrar el valor de corriente y voltaje cada celda en el formato de <<registro de celdas LiFePO ₄ mod. 18650>>.	Registro de celdas LiFePO ₄ mod. 18650.
	5	Etiquetar celda conforme a la numeración correspondiente	
	6	Almacenar temporalmente celda en la caja para su posterior clasificación	

Los parámetros de rendimiento eléctricos críticos de cada celda, se registran inicialmente en formatos físicos para posteriormente integrarse a la base de datos de Excel. Esta información conforma el historial técnico de cada celda y se vincula de manera automática a la codificación individual previamente adherida.

El objetivo de esta recolección de datos es ejecutar una clasificación precisa de las celdas, garantizando que cada caja de almacenamiento contenga exclusivamente celdas con perfiles eléctrico similares. La secuencia de este proceso se expone en el flujograma de proceso presentado en la Ilustración 21.

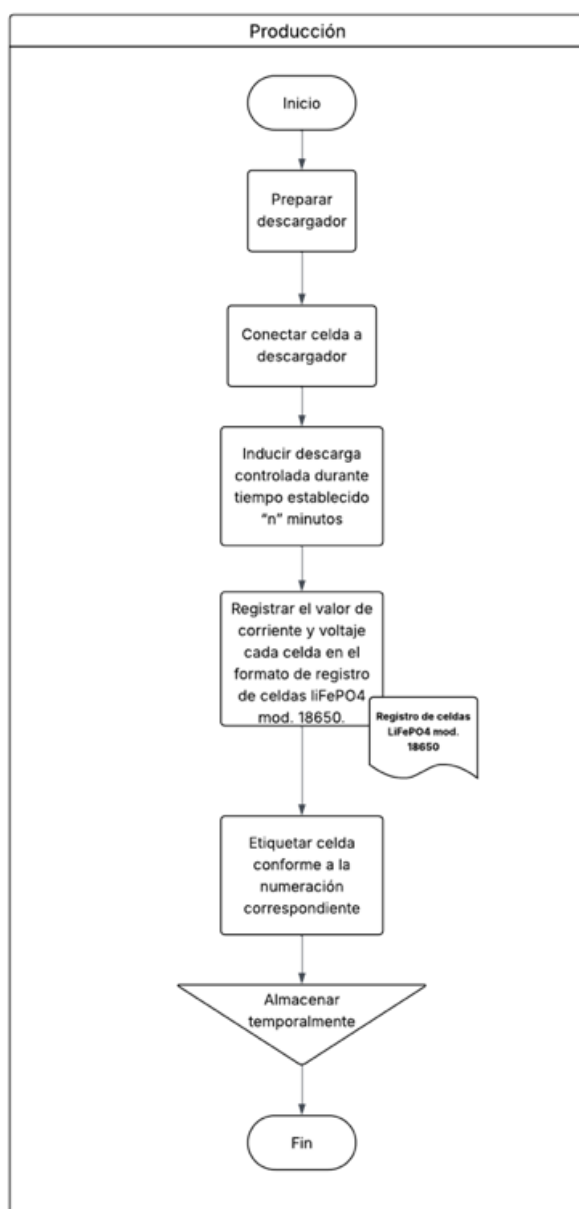


Ilustración 21:Flujograma de proceso de descarga de celdas.
Elaboración propia.

Dentro del formato de registro de celdas se busca tener control de los datos obtenidos durante las pruebas de descarga controlada de cada una de las celdas.

Esta información sirve de respaldo para poder ser procesada en la base de datos de control de celdas, donde se generará el análisis para su correcta clasificación y almacenamiento de celdas. Se tendrán que registrar valores de número de celda, voltaje y corriente. En la Ilustración 22 se muestra el formato de registro de celdas mod.18650 y 21700.

[illegible]

3.3.5 Proceso: Clasificación de celdas

Esta clasificación ayudará en gran forma en el proceso de ensamble de baterías al tener cada una de las celdas debidamente clasificadas con respecto a sus características funcionales; de esta forma, en el ensamble solo se integrarán en cada pack celdas que sean similares en características.

60

Tabla 18: Proceso de clasificación de celdas. Elaboración propia.

UNIDAD QUE INTERVIENE	ACT.	DESCRIPCIÓN	DOCUMENTO Y CÓDIGO
PRODUCCIÓN	1	Registrar los datos obtenidos del formato: <<registro de celdas LiFePO ₄ mod.18650>> a la base de datos <<Organización de celdas>> (digital)	Formato de registro de celdas LiFePO ₄ mod. 18650 Base de datos organización de celdas (digital)
	2	Organizar las celdas de acuerdo con sus límites de voltaje, tomando en cuenta parámetros de voltaje	
	3	Asignar cajas de almacenamiento a las celdas con base en sus límites de voltaje.	
	4	Realizar conteo de número de celdas en cada caja.	
	5	Verificar que el número de celdas en las cajas concuerde con la base de datos.	
	6	Almacenar	

La organización física de los componentes está regida por límites de voltaje estrictos, los cuales fueron determinados a partir del análisis de comportamiento energético durante las pruebas de descarga.

Con esta parametrización, se busca fortalecer el sistema de calidad al garantizar el acceso inmediato al historial funcional de cada celda. La secuencia de esta clasificación se detalla en el flujograma de la Ilustración 23.

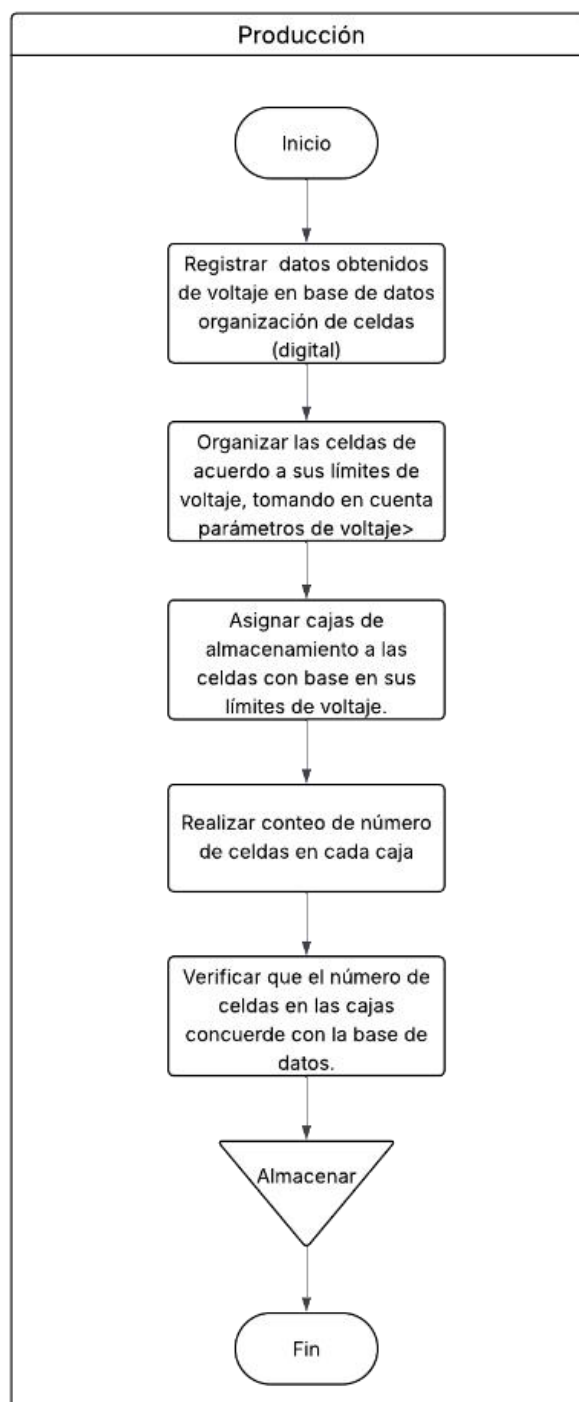


Ilustración 23: Flujograma de proceso de clasificación de celdas.
Elaboración propia.

Los valores de parámetros de voltaje para clasificación de celdas fueron propuestos de acuerdo con cálculos en el análisis de voltaje de celdas durante su proceso de descarga; se propuso que cada parámetro de voltaje sea organizado por un color en especial. Dicha información se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19: Tabla de parámetros de voltaje para clasificación de celdas. Elaboración propia.

Parámetros de Voltaje 	
Parámetro de voltaje.	Clasificación por Color.
2.55 - 2.6	Gris.
2.61 - 2.65	Azul.
2.66 - 2.7	Naranja.
2.71 - 2.75	Rojo.
2.76 - 2.8	Morado.
2.81 - 2.85	Amarillo.
2.86 - 2.9	Verde.

La Ilustración 24 muestra la interfaz de la base de datos generada en Excel. La base de datos está estructurada de manera que cada caja de almacenamiento, identificada con su prefijo "TXC" y número consecutivo cuenta con una hoja de cálculo exclusiva. Dentro de cada pestaña, el sistema cuantifica el total de unidades resguardadas y despliega una matriz de registro individual de cada celda, vinculando el número de identificación único de cada celda con sus valores eléctricos específicos, consolidando así el expediente técnico del lote o caja de almacenamiento.

Ilustración 24: Base de datos de organización de celdas. Elaboración propia.

3.3.6 Proceso: Ensamble de celdas

El objetivo de este proceso es establecer un procedimiento estandarizado para el proceso de ensamble de celdas y módulos para un correcto armado de baterías, que garantice la consistencia en la calidad del producto final, minimice los errores durante el proceso de ensamble y optimice el tiempo de producción, asegurando que cada batería cumpla con los estándares de seguridad y funcionamiento establecidos por la empresa. El proceso detallado se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20: Proceso de ensamble de celdas. Elaboración propia.

UNIDAD QUE INTERVIENE	ACT.	DESCRIPCIÓN	DOCUMENTO Y CÓDIGO
PRODUCCIÓN	1	Colocar celdas en molde según el arreglo (Serie-Paralelo-Mixto)	
	2	Soldar tiras conductoras de níquel sobre las celdas según arreglo y cantidad definida de tiras de níquel.	
	3	Inspeccionar físicamente tiras de níquel después de soldar a celdas.	
	4	Ordenar módulos con respecto a arreglo eléctrico de modelo correspondiente de batería.	Formato ensamble de modelo correspondiente de batería. (Diseño)
	5	Soldar módulos en circuito mixto, con tiras de níquel dependiendo cantidad definida de tiras de níquel.	
	6	Inspeccionar unión de módulos físicamente.	
	7	Medir voltaje de pack, comprobar que voltaje final sea correcto con respecto a diseño.	

En este proceso se sugiere reforzar la inspección por su alta criticidad en la calidad y confiabilidad del producto al existir errores, se sugieren inspecciones visuales y físicas del producto, a la vez de tener ayudas visuales con la cantidad de tiras conductoras de níquel que se deben ensamblar de acuerdo con el modelo correspondiente, también se sugiere medir voltajes del pack terminado para asegurar que el arreglo eléctrico fue hecho de forma correcta con respecto al diseño

preestablecido. La secuencia de este proceso se detalla en el flujograma de la Ilustración 25.

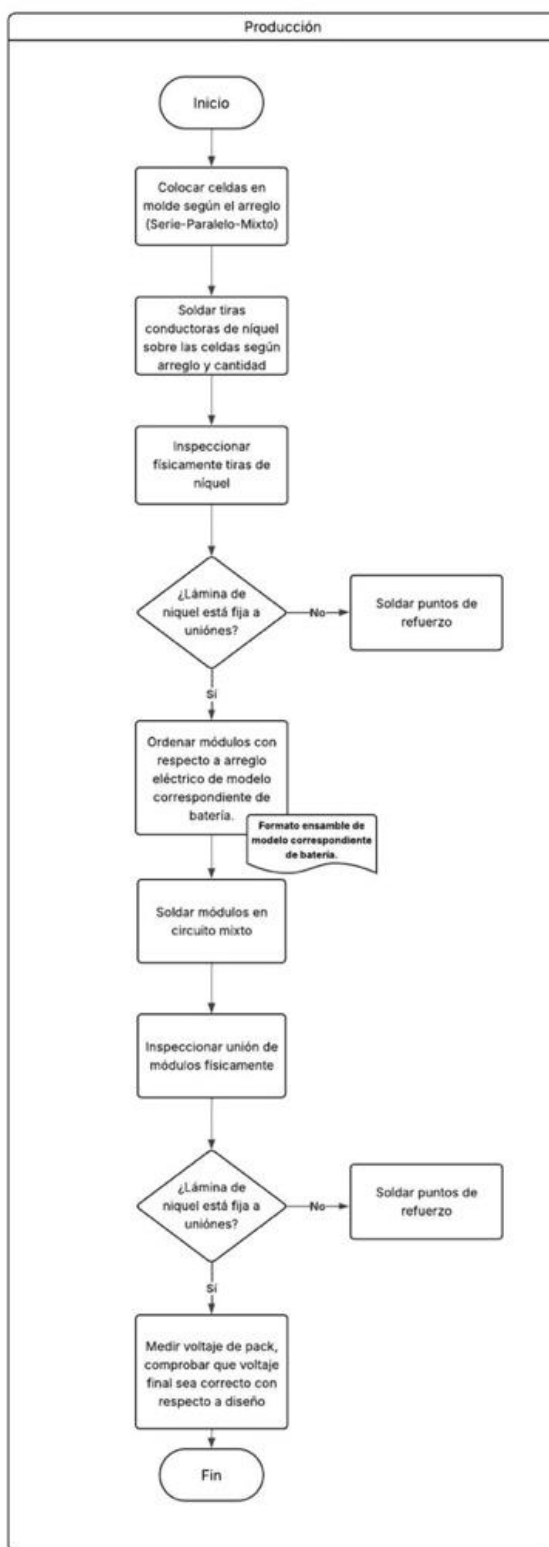


Ilustración 25: Flujograma de proceso de ensamble de celdas.
Elaboración propia.

3.3.7 Proceso: Conexión de cables balanceadores del Sistema de Gestión de Baterías (BMS)

La etapa de integración del Sistema de Gestión de Baterías representa un punto crítico para la viabilidad y seguridad del ensamble. Con el objetivo de garantizar el equilibrio de voltaje entre las celdas y maximizar la vida útil del módulo, se estableció un procedimiento estandarizado, preciso y seguro para la conexión de los cables balanceadores. La correcta ejecución de este proceso es muy importante para asegurar el monitoreo continuo del paquete, previniendo sobrecargas o sobredescargas y minimizando el riesgo de fallos eléctricos durante su operación. El proceso detallado se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21: Proceso de conexión de cables balanceadores del Sistema de Gestión de Baterías (BMS). Elaboración propia.

UNIDAD QUE INTERVIENE	ACT.	DESCRIPCIÓN	DOCUMENTO Y CÓDIGO
PRODUCCIÓN	1	Verificar posición de conexión de cableado del Sistema de Gestión de Baterías con respecto a <<Ayuda visual de cableado y conexión BMS >> y <<Formato de ensamble de batería de modelo correspondiente>>.	Ayuda visual de cableado y conexión BMS. Formato de ensamble de batería de modelo correspondiente.
	2	Soldar cables balanceadores a polo negativo de cada módulo en serie de pack de batería, tomar en cuenta <<Ayuda visual de cableado de BMS>> y <<Formato de ensamble de batería de modelo correspondiente>>.	Ayuda visual de cableado y conexión BMS. Formato de ensamble de batería de modelo correspondiente.
	3	Hacer una inspección de la calidad de la soldadura.	Lista de chequeo de ensamble de baterías LiFePO_4
	4	Medir el voltaje de salida en cada cable balanceador hasta sumar voltaje total del pack, comparar valores de acuerdo con <<Lista de chequeo de ensamble de baterías LiFePO_4 >>.	Lista de chequeo de ensamble de baterías LiFePO_4

En este proceso se sugiere estandarizar la posición de conexiones del cableado del Sistema de Gestión de Baterías (BMS) en el pack de batería, con

respecto a cada modelo y al arreglo del pack de batería. Dicha información estará disponible en forma de ayudas visuales para cada modelo; de esta forma, se facilitará al operario verificar la posición de cables balanceadores e inspecciones futuras. Se sugiere inspeccionar periódicamente que el operario corrobore la sumatoria de voltajes después de soldar los cables balanceadores y registrar dicha información en la lista de chequeo propuesta, la cual será validada por el operario y supervisor en turno. La secuencia de este proceso se detalla en el flujograma de la Ilustración 26.

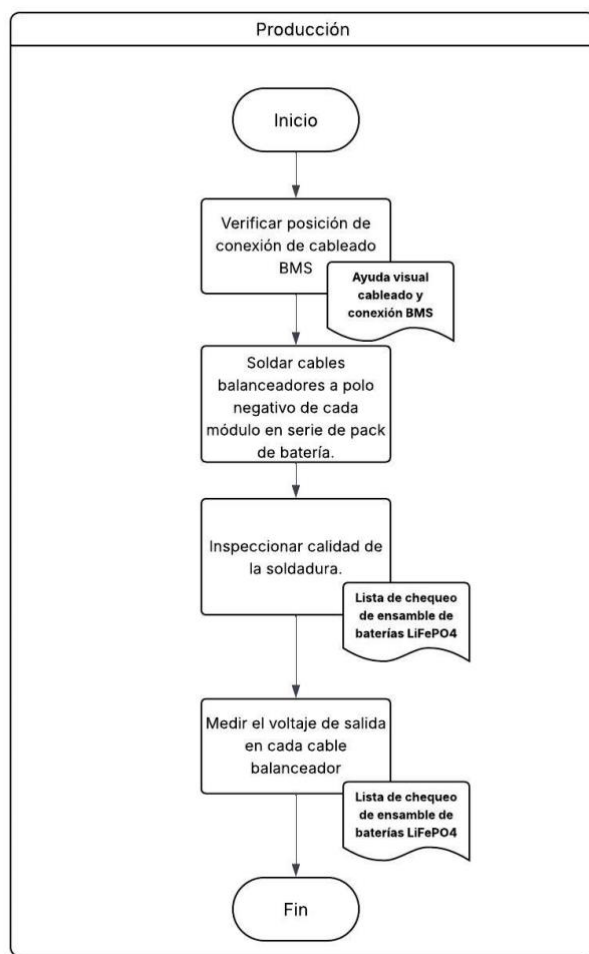


Ilustración 26: Flujograma de proceso de conexión de cables balanceadores de BMS.
Elaboración propia.

Para fomentar la prevención de errores durante el cableado del Sistema de Gestión de Baterías, se integró una Tabla de verificación dentro de la lista de chequeo de ensamble de baterías LiFePO₄.

La Ilustración 27 presenta esta Tabla de referencia, la cual detalla los valores esperados en cada terminal. Esta herramienta le permite al operario validar que los cables balanceadores están en la secuencia correcta, ya que una instalación adecuada debe reflejar una sumatoria de voltaje uniforme y escalonada en cada medición, hasta alcanzar el voltaje total del pack. Cualquier desviación indica un error de conexión que debe corregirse antes de energizar el BMS.

Folio:002



T1. Voltaje de referencia para modelos de baterías LiFePO₄

Modelo	Voltaje mínimo	Voltaje nominal (V)	Voltaje máximo	Corriente (A)
4S1P-UPS	10 V	12.8 V	15 V	15 A
8S1P-UPS	20 V	25.6 V	30 V	15 A
12S7P-MINIGOLF	30 V	38.4 V	45 V	105 A
16S1P-SCO	40 V	51.2 V	58.8 V	15 A
16S2P-RACE	40V	51.2 V	58.8 V	20 A
16S3P-RACE	40 V	51.2 V	58.8 V	45 A
16S5P-MINIGOLF	40 V	51.2 V	58.8 V	75 A
16S10P-CARCONV	40 V	51.2 V	58.8 V	150 A
26S2P-MOTO	65 V	83.2 V	97.5 V	30 A

T2. Valores de referencia en voltaje BMS

Modelo	4S1P-UPS	8S1P-UPS	12S7P-MINIGOLF	16S1P-SCO	16S2P-RACE	16S3P-RACE	16S5P-MINIGOLF	16S10P-CARCONV	26S2P-MOTO
PIN 1	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V
PIN 2	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V
PIN 3	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V
PIN 4	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V
PIN 5	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V
PIN 6	-	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V
PIN 7	-	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V
PIN 8	-	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V
PIN 9	-	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V
PIN 10	-	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V
PIN 11	-	-	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V
PIN 12	-	-	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V
PIN 13	-	-	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V
PIN 14	-	-	-	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V
PIN 15	-	-	-	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V
PIN 16	-	-	-	52.125±0.275 V	52.125±0.275 V	52.125±0.275 V	52.125±0.275 V	52.125±0.275 V	52.125±0.275 V
PIN 17	-	-	-	55.6±0.275 V	55.6±0.275 V	55.6±0.275 V	55.6±0.275 V	55.6±0.275 V	55.6±0.275 V
PIN 18	-	-	-	-	-	-	-	-	59.075±0.275 V
PIN 19	-	-	-	-	-	-	-	-	62.55±0.275 V
PIN 20	-	-	-	-	-	-	-	-	66.025±0.275 V
PIN 21	-	-	-	-	-	-	-	-	69.5±0.275 V
PIN 22	-	-	-	-	-	-	-	-	72.975±0.275 V
PIN 23	-	-	-	-	-	-	-	-	76.45±0.275 V
PIN 24	-	-	-	-	-	-	-	-	79.925±0.275 V
PIN 25	-	-	-	-	-	-	-	-	83.4±0.275 V
PIN 26	-	-	-	-	-	-	-	-	86.875±0.275 V
PIN 27	-	-	-	-	-	-	-	-	90.35±0.275 V

Ilustración 27: Valores de referencia en voltaje en cables balanceadores.
Elaboración propia.

Para garantizar la confiabilidad de las conexiones del sistema, se desarrolló una instrucción de trabajo para el proceso de soldadura de los cables balanceadores. La Ilustración 28 expone la ayuda visual diseñada para el operario, la cual detalla de manera gráfica y secuencial la técnica correcta para fijar los cables balanceadores a las tiras de níquel. Este documento establece los parámetros operativos clave como la temperatura de aplicación a 480°C del estaño con el cautín y la cantidad adecuada de estaño que se debe poner en las tiras de níquel, también se integra una guía de inspección con criterios claros de aceptación y rechazo, para prevenir y detectar defectos críticos.

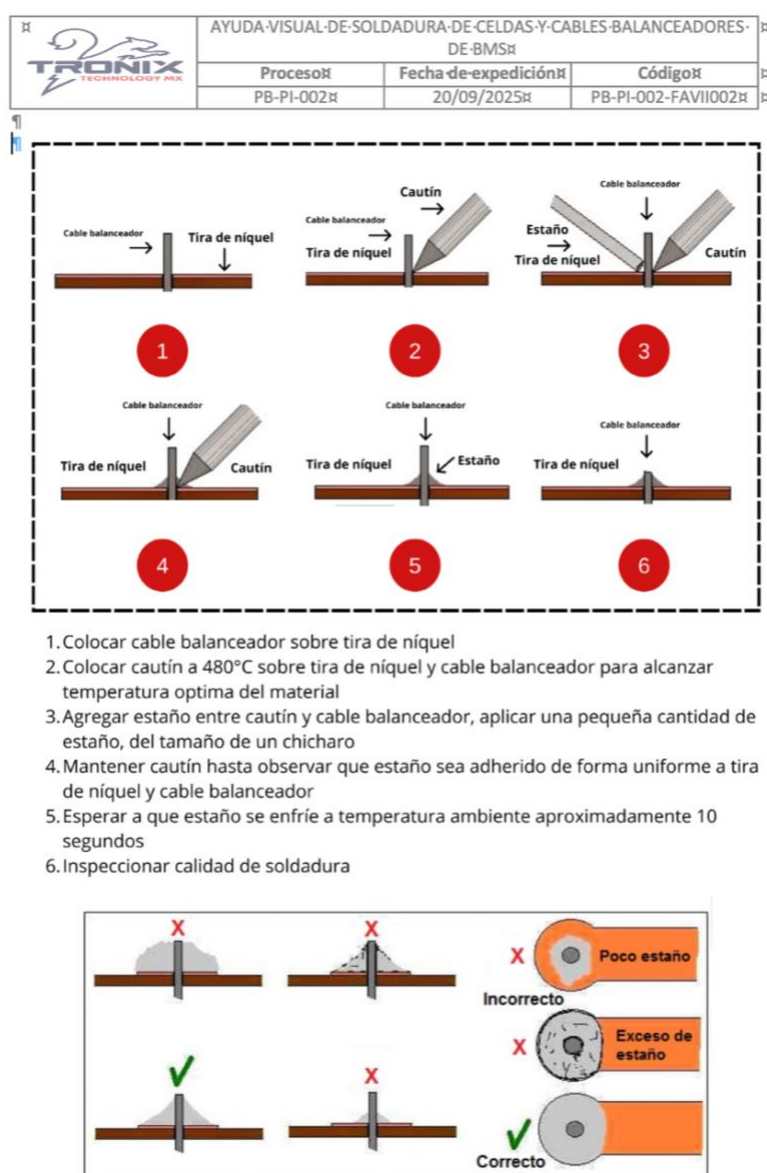


Ilustración 28: Ayuda visual de soldadura de celdas y cables balanceadores de BMS. Elaboración propia.

3.3.8 Proceso: Conexión del Sistema de Gestión de Baterías (BMS)

El objetivo principal de este proceso es implementar un proceso preciso y seguro para la conexión del sistema, asegurando que todos los componentes estén correctamente integrados y alineados con las especificaciones técnicas, a fin de garantizar la protección, el equilibrio de las celdas de la batería y optimizar el rendimiento del sistema. El proceso detallado se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22: Proceso de conexión de BMS. Elaboración propia.

UNIDAD QUE INTERVIENE	ACT.	DESCRIPCIÓN	DOCUMENTO Y CÓDIGO
PRODUCCIÓN	1	Soldar el cable (B) al polo negativo de la batería	Ayuda visual de cableado y conexión BMS
	2	Inmovilizar al pack de batería	
	3	Conectar cables balanceadores y cable (B) al BMS	Ayuda visual de cableado y conexión BMS
	4	Conectar sensor de temperatura.	
	5	Conectar el módulo Bluetooth en entrada UART.	
	6	Inspeccionar el voltaje final en BMS	Lista de chequeo de ensamble de baterías LiFePO ₄
	7	Cargar por completo batería con su cargador preestablecido	Lista de chequeo de ensamble de baterías LiFePO ₄
	8	Registrar módulo Bluetooth en el formato << Orden de producción (digital)>>.	Orden de producción (digital).

Se sugiere que para el proceso de conexión existan ayudas visuales que proporcionen al operador información sobre cómo debe verse una soldadura correcta, además, información del orden del cableado y conexión para minimizar errores por conexiones incorrectas que comprometan el funcionamiento del sistema, se sugiere para este proceso la implementación de una lista de chequeo en donde se inspeccione el ensamble del BMS, validado por el operador y el supervisor en turno. La secuencia de este proceso se detalla en el flujograma de la Ilustración 29.

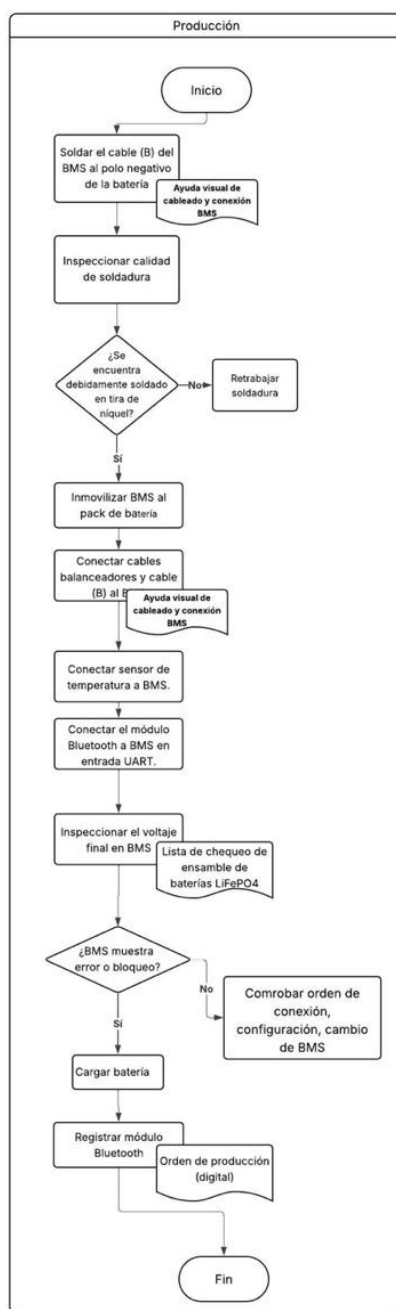


Ilustración 29: Flujograma de proceso de conexión de BMS.
Elaboración propia.

Para asegurar la correcta integración física y eléctrica del BMS, se desarrolló una hoja de especificaciones y ayuda visual detallada para cada modelo, tomando como referencia la configuración de un sistema BMS 16S. La Ilustración 30 muestra esta ayuda visual, la cual proporciona una guía que incluye diagramas esquemáticos, especificación de calibres de cableado (AWG 12 para potencia y 22 para balanceo), y una matriz de ruteo de los cables balanceadores, módulo por módulo (M1 a M16).

Adicionalmente se detalla la ubicación de los sensores que debe tener el sistema (NTC, conectividad UART) y la correcta asignación de las terminales de descarga B- y P-, blindando el proceso de ensamble contra errores de polaridad ya que podría ser un error crítico.



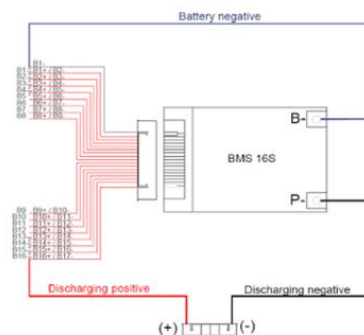
BMS 16S

Especificaciones

Modelo 1	Modelo 2
Dimensiones	Dimensiones
Longitud: 81 mm	Longitud: 220 mm
Altura: 61 mm	Altura: 100 mm
Profundidad: 11 mm	Profundidad: 32 mm

Terminales de control

- Sensor de voltaje/ecualizador
- UART data
- Sensor de temperatura NTC
- Power display



Identificación de cableado y conexiones BMS

CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN DE CABLE	CALIBRE	MEDIDA	TIPO DE VOLTAJE
B1	22	60 cm	NEGATIVO
B2	22	60 cm	POSITIVO
B3	22	60 cm	POSITIVO
B4	22	60 cm	POSITIVO
B5	22	60 cm	POSITIVO
B6	22	60 cm	POSITIVO
B7	22	60 cm	POSITIVO
B8	22	60 cm	POSITIVO
B9	22	60 cm	POSITIVO
B10	22	60 cm	POSITIVO
B11	22	60 cm	POSITIVO
B12	22	60 cm	POSITIVO
B13	22	60 cm	POSITIVO
B14	22	60 cm	POSITIVO

B15	22	60 cm	POSITIVO
B16	22	60 cm	POSITIVO
B17	22	60 cm	POSITIVO
DISCHARGING NEGATIVE	12	60 cm	NEGATIVO
BATTERY NEGATIVE	12	60 cm	NEGATIVO
DISCHARGING POSITIVE	12	60 cm	POSITIVO

CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN DE CABLE	CALIBRE	GUIA DE CONEXIÓN
B1	22	(-) M1
B2	22	(-) M2
B3	22	(-) M3
B4	22	(-) M4
B5	22	(-) M5
B6	22	(-) M6
B7	22	(-) M7
B8	22	(-) M8
B9	22	(-) M9
B10	22	(-) M10
B11	22	(-) M11
B12	22	(-) M12
B13	22	(-) M13
B14	22	(-) M14
B15	22	(-) M15
B16	22	(-) M16
B17	22	Polo positivo módulo 16
DISCHARGING NEGATIVE	12	Sueldo de BMS (P-)
BATTERY NEGATIVE	12	Polo Negativo de módulo 1
DISCHARGING POSITIVE	12	Polo Positivo Módulo 16

Ilustración 30: Ayuda visual de conexión de BMS. Elaboración propia.

3.3.9 Proceso: Revestimiento de la batería

El objetivo de este proceso es garantizar que el revestimiento de la batería sea aplicado de manera uniforme y segura, asegurando la protección integral de las celdas y componentes internos frente a impactos, humedad y otros factores externos, cumpliendo con los estándares de calidad y seguridad requeridos para su uso. El proceso se muestra de forma detallada en la Tabla 23.

Tabla 23: Proceso de revestimiento de batería. Elaboración propia.

UNIDAD QUE INTERVIENE	ACT.	DESCRIPCIÓN	DOCUMENTO Y CÓDIGO
PRODUCCIÓN	1	Colocar y centrar pack de batería dentro del plástico termoadherible.	
	2	Aplicar calor (160°C) durante 60 segundos	
	3	Inspeccionar calidad de adhesión	
	4	Registrar los resultados en el formato <<Lista de chequeo de inspección de baterías LiFePO ₄ >>	Lista de chequeo de inspección de baterías LiFePO ₄

El proceso de revestimiento final del paquete de baterías, mediante la aplicación de plástico termoadherible, requiere de cuidado riguroso, debido a que, al ser un material delicado, se pueden generar retrabajos por dañar el material y dejar expuesto el pack de baterías.

Para minimizar la incidencia de retrabajos y el desperdicio continuo de insumos, se estableció un procedimiento que regula la técnica y el tiempo de exposición al calor.

La falta de este control genera un estrés térmico localizado que compromete el plástico, provocando su ruptura y dejando el pack de batería expuesto, lo cual representa un riesgo crítico de seguridad. La secuencia de pasos para asegurar un revestimiento uniforme, seguro y libre de defectos térmicos se muestra en el flujograma de la Ilustración 31.

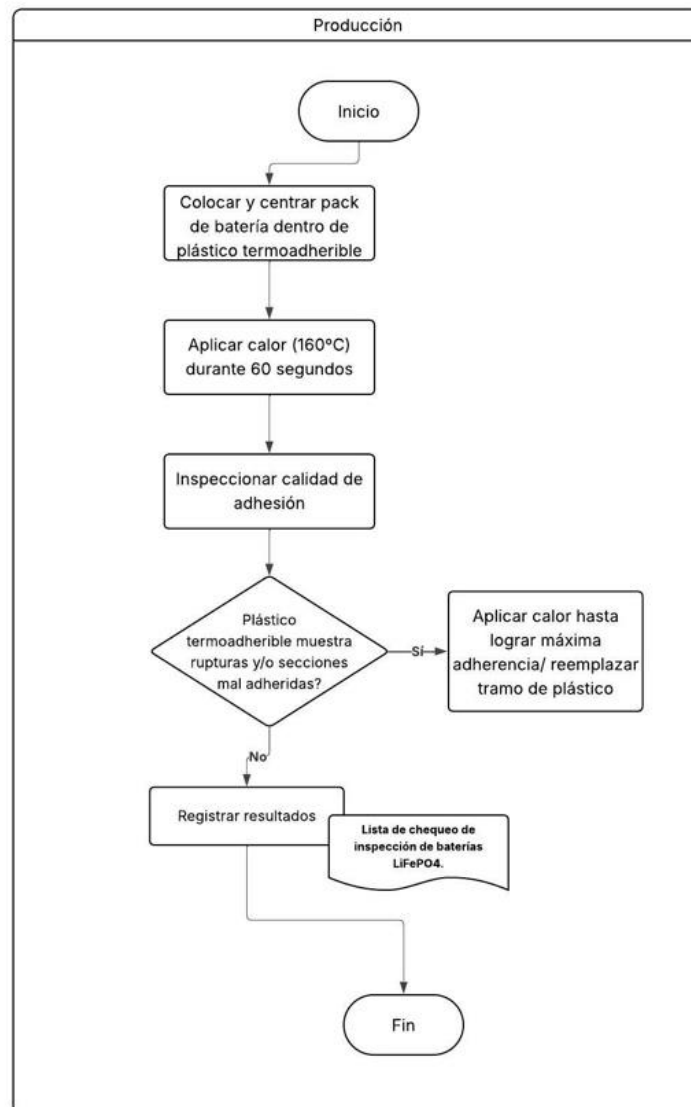


Ilustración 31: Flujograma de proceso de revestimiento de batería. Elaboración propia.

Como parte de control en el proceso de ensamble para, se estructuró un formato de lista de chequeo. La Ilustración 32 muestra esta lista de chequeo El formato concentra la verificación de todos los puntos críticos detallados previamente, evaluando de forma integrada el estado físico de las celdas, los parámetros eléctricos de voltajes y BMS, la correcta integración de sensores, la calidad estética y estructural del pack de batería en el embalaje final (caja metálica, silicón y termoadherible). Cada lista de chequeo debe contener la firma del supervisor en turno, lo cual certifica que el pack de batería cumple con el estándar de calidad.

Folio:016



[LISTA DE CHEQUEO DE INSPECCIÓN DE BATERIAS LIFEPO4]

Almacén	YXTZ-01	Marca	TRONIX TECHNOLOGY
Area de Trabajo	Producción	Modelo	

Fecha

C.R.

REGULAR=R

MAL ESTADO=M

BIEN=OK

INSPECCIÓN	OK	R	M	OBSERVACIONES	ACCIONES CORRECTIVAS
Celdas					
Compruebe que las celdas no tienen grietas ni signos de pérdida de electrolito.					
Asegúrese de que la celda no esté sucia ni húmeda.					
Asegúrese que la tira de níquel esté correctamente soldada a la tira de cobre de la celda.					
Asegúrese de que todas las celdas tengan un voltaje similar dentro de los límites especificados en la orden de producción.					
Asegúrese que las celdas no tengan golpes significativos que puedan afectar su funcionamiento.					
Voltajes					
Comprobar que la batería tenga voltaje terminal (revisar valores de referencia de modelo T1).					
BMS					
Verifique que los cables de conexión de la batería a BMS son del tamaño correcto.					
Verifique si los cables del BMS no están deshilachados y el aislamiento no está dañado.					
Verifique que el voltaje de salida en cada cable del BMS sea correcto (ver tabla de referencias T2).					
Comprobar que el Bluetooth y sensor de temperatura están funcionando correctamente.					
Corroborar que la programación de BMS es correcta.					
Equalizador					
Verifique que los cables de conexión de la batería a Equalizador son del tamaño correcto.					
Monitoree el funcionamiento durante un periodo inicial para asegurarse que el equalizador esté trabajando correctamente.					
Verifique que el voltaje de salida en cada cable del equalizador sea correcto (ver tabla de referencias T2).					
Caja metálica					
La caja metálica cuenta con asas laterales de transporte manual.					
La caja cuenta con código de identificación.					
Verifique que no existan abolladuras, grietas o daños visibles en la superficie exterior de la caja metálica.					
Verifique que el color y acabado sean uniformes.					
La caja cuenta con información referente a valores nominales de la batería.					
Empaque de silicon					
Verifique que el empaque de silicon haya sellado herméticamente en la caja metálica.					
Empaque de plástico termoadherible					
Asegurarse que no se observen protuberancias de la batería en el empaque.					

Nombre y firma del técnico supervisor

Ilustración 32: Formato de lista de chequeo de inspección de baterías LiFePO₄. Elaboración Propia.

3.3.10 Formulación de Indicadores Clave de Desempeño (KPIs)

La formulación de los Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) se desarrolló con base en los resultados obtenidos en el diagnóstico del proceso de ensamble, el cual incluyó el análisis de Pareto, el diagrama de Ishikawa y el AMEF.

El análisis de Pareto permitió identificar que la mayor parte de defectos se concentra en fallas eléctricas, fallas de ensamble y fallas relacionadas con las celdas. Posteriormente, el diagrama de Ishikawa mostró que dichas fallas tienen su origen principalmente en los métodos de trabajo y la mano de obra. Finalmente, el análisis

AMEF evaluó el nivel de riesgo asociado a cada modo de falla, destacando la necesidad de controles más estrictos en el proceso.

Los KPIs fueron formulados para medir la eficacia de las mejoras y mejorar la detección temprana de fallas. Para facilitar el seguimiento y control, los indicadores propuestos se han consolidado en la Tabla 24, detallando su objetivo, fórmula de cálculo y frecuencia de medición.

Tabla 24: Formulación de KPIs. Elaboración propia.

Nombre del KPI	Objetivo del Indicador KPI	Fórmula de cálculo de KPI	Frecuencia
Configuración correcta de BMS	Medir la eficacia del proceso de configuración del sistema para evitar fallas críticas	$\left(\frac{\text{BMS configurados correctamente}}{\text{Total de BMS ensamblados}} \right) \times 100$	Diaria
Tasa de retrabajos en BMS	Cuantificar la incidencia de errores de conexión o configuración que requirieron corrección	$\left(\frac{\text{Retrabajos en BMS}}{\text{Total de BMS ensamblados}} \right) \times 100$	Mensual
Tasa de defectos eléctricos por ensamble	Evaluar la efectividad de las mejoras en la integración del cableado, ruteo eléctrico y errores de ensamble	$\left(\frac{\text{Defectos eléctricos detectados}}{\text{Total de ensambles realizados}} \right) \times 100$	Diaria
Calidad en soldadura de celdas	Monitorear y reducir fallas de alta resistencia eléctrica y	$\left(\frac{\text{Puntos de soldadura aceptados}}{\text{Total de puntos evaluados}} \right) \times 100$	Diaria

	riesgos en las uniones de los módulos		
Ensamble de módulos sin retrabajo	Medir la eficiencia en la conformación física del pack de batería	$\left(\frac{\text{Módulos sin retrabajo}}{\text{Total de módulos ensamblados}} \right) \times 100$	Diaria
Balanceo de celdas previo al ensamble	Asegurar la correcta selección y preparación de las celdas antes de unir las	$\left(\frac{\text{Celdas balanceadas}}{\text{Total de celdas evaluadas}} \right) \times 100$	Diaria

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Implementación piloto

El objetivo de la implementación piloto del proceso es validar, en un entorno controlado, la efectividad de las mejoras propuestas al proceso de ensamble de baterías de litio, así como evaluar el impacto inicial de la aplicación de indicadores clave de desempeño (KPIs) y acciones de mejora definidas a partir del análisis de Pareto, el diagrama de Ishikawa y el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF).

La implementación piloto se llevó a cabo en un segmento específico del proceso de ensamble de baterías de litio, considerando un periodo de prueba limitado y controlado.

Esta implementación incluyó las etapas críticas del proceso, de las cuales se diseñaron sus respectivos procesos y documentación necesaria en el punto anterior. Dichas etapas críticas comprenden el ensamble y configuración del BMS, la conexión de módulos de celdas, la soldadura de celdas y la integración del

cableado. Por razones de confidencialidad, los datos presentados se muestran de manera general y no incluyen información sensible de la empresa.

Se llevó a cabo la implementación piloto de la propuesta de diseño del sistema de control y aseguramiento de la calidad en el proceso de ensamble de baterías de LiFePO_4 en la empresa ensambladora de baterías durante un periodo comprendido entre 3 meses (del 8 de septiembre de 2025 al 8 de diciembre de 2025). Se aplicó dicha implementación en un total de 30 órdenes de producción.

4.1.1 Mejora en clasificación de celdas

Durante la implementación se estandarizó el procedimiento de clasificación y selección de celdas, mediante la elaboración de instrucciones de trabajo, listas de verificación, base de datos de control, etiquetas de identificación y rastreo.

Como evidencia de la ejecución física del sistema de trazabilidad diseñado, se llevó a cabo la impresión y colocación de las etiquetas identificadoras en el piso de producción. La Ilustración 33 muestra la implementación de esta codificación.



Ilustración 33: Implementación de codificación de celdas. Elaboración propia.

La Ilustración 34 documenta la implementación de codificación en las cajas de almacenamiento de celdas, tal como se estableció en la propuesta de control de trazabilidad, cada etiqueta exhibe la nomenclatura oficial compuesta por el prefijo

"TXC" complementado con su folio consecutivo. Con esta mejora se logró asegurar la rápida localización de las celdas clasificadas.

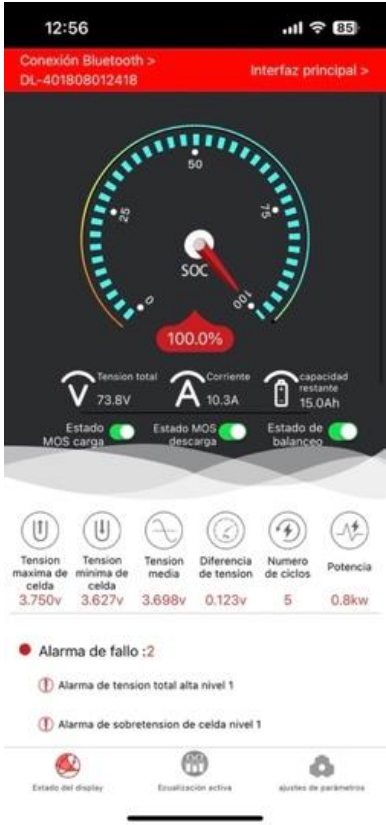


Ilustración 34: Implementación de codificación en cajas de almacenamiento de celdas. Elaboración propia.

La mejora en la clasificación y selección de celdas generó mejoras en el comportamiento general del pack de baterías, minimizando en gran medida defectos por desbalanceo de celdas. Dicha mejora fue validada mediante la prueba de packs de batería sometidos a su máxima capacidad durante periodos de 1 semana en uso constante.

Los datos de balanceo fueron mostrados mediante la aplicación de monitoreo del BMS de la batería, presentados en la Tabla 25, mostrando diferencias de tensión muy bajas en comparación con la metodología anterior a la implementación de las mejoras, siendo menores a 0,020 V (diferencia de tensión aceptable).

Tabla 25: Tabla de diferencias antes y después de la aplicación de mejora de clasificación de celdas. Elaboración propia.

Diferencia de tensión en pack de batería antes de aplicación de mejoras	Diferencia de tensión en pack de batería después de la aplicación de mejoras
	

Como se puede observar, existían en los packs de batería diferencias de hasta 0.122 V; dicha diferencia podía exponer a la batería a que, en usos prolongados durante su uso normal, se produjeran desbalances altos que pudieran bajar el rendimiento de la batería y, a su vez, disminuir su vida útil a lo largo del tiempo.

Dicha mejora se basó en gran parte con la definición de procesos y el uso del software Excel para la gestión de la información, en donde se generaron bases de datos con Tablas dinámicas que al registrar la información de cada celda, la base de datos automáticamente da un color a cada celda dependiendo sus valores de

voltaje, posteriormente la base de datos sugiere la organización de celdas de acuerdo con sus límites y colores similares, de esta forma se logra que, al hacer un pack de baterías, cada celda tenga similitudes, tal como se explica en el proceso de clasificación de celdas.

La base de datos también contabiliza automáticamente el número actual de celdas disponibles en cada caja de almacenamiento; esto se logró por medio de Tablas dinámicas, que, al retirar cada celda, se debe registrar dentro de la misma base de datos para que pueda llevarse a cabo la contabilización de celdas.

En la Ilustración 35 se muestra de forma detallada la interfaz de la base de datos para la gestión de la información, generada en Excel.

CODIGO	NUMERO	VOLTAJE	CORRIENTE
81718650	817	2,71	44,19
215118650	2151	2,74	44,25
216018650	2160	2,71	43,28
217718650	2177	2,74	43,66
219318650	2193	2,71	43,95
225018650	2250	2,74	44,71
231518650	2315	2,74	44,23
232218650	2322	2,72	44,72
247218650	2472	2,75	45,23
247818650	2478	2,73	43,71
248418650	2484	2,74	44,02
248718650	2487	2,74	43,05
249318650	2493	2,75	44,25
250318650	2503	2,73	43,62
250618650	2506	2,73	42,7
250718650	2507	2,71	43,35
251418650	2514	2,75	43,83
251718650	2517	2,71	43,38
251918650	2519	2,74	42,97
252918650	2529	2,71	43,73
254018650	2540	2,73	43,85

Código de rastreo	Fecha	Hora	Capacidad	Tiempo de carga	Lote o caja
81718650	11/10/2025	11:29:47	77	2:39	TXC-20
215118650	11/10/2025	11:56:00	75	2:38	TXC-20
216018650	11/10/2025	12:28:17	11	0:45	TXC-20
217718650	11/10/2025	11:55:42	49	1:27	TXC-20
219318650	11/10/2025	11:52:04	20	0:00:58	TXC-20
225018650	11/10/2025	12:04:04	92	2:38	TXC-20
231518650	11/10/2025	11:44:50	22	1:08	TXC-20
232218650	11/10/2025	12:29:24	28	1:22	TXC-20
247218650	11/10/2025	12:41:10	11	0:00:44	TXC-20
247818650	11/10/2025	11:54:10	105	3:19	TXC-20
248418650	11/10/2025	11:56:25	55	1:48	TXC-20
248718650	11/10/2025	12:40:08	21	1:06	TXC-20
249318650	11/10/2025	11:57:42	50	1:54	TXC-20
250318650	11/10/2025	12:43:38	112	3:31	TXC-20
250618650	11/10/2025	12:42:18	134	3:49	TXC-20
250718650	11/10/2025	11:49:40	11	0:00:46	TXC-20
251418650	11/10/2025	11:50:16	59	1:50	TXC-20
251718650	11/10/2025	12:44:50	27	1:11	TXC-20
251918650	11/10/2025	11:28:17	104	2:49	TXC-20
252918650	11/10/2025	13:12:27	337	8:33	TXC-20
254018650	11/10/2025	11:48:21	49	1:48	TXC-20

Ilustración 35: Base de datos de organización de celdas. Elaboración propia.

4.1.2 Mejora en ensamble y configuración del Sistema de Gestión de Baterías (BMS)

Durante la implementación piloto se estandarizó el procedimiento de ensamble y configuración del sistema mediante la elaboración de instrucciones de trabajo y listas de verificación. Se implementó una validación funcional previa a la liberación del ensamble para asegurar la correcta configuración de los parámetros de protección y monitoreo, además, se hicieron diseños mediante CAD para validar las conexiones y reforzar el procedimiento de ensamble.

En la Ilustración 36 se muestra el ejemplo de un diseño específico por cada modelo de pack de batería en donde se debe mostrar la ubicación del sistema, de las conexiones e información de la posición de los cables balanceadores

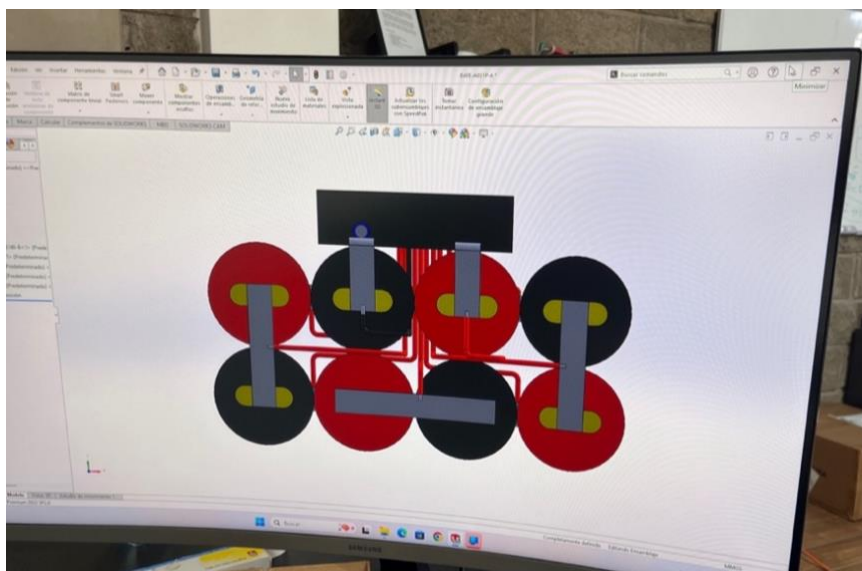


Ilustración 36: Diseño CAD de ensamble de BMS. Elaboración propia.

Para el proceso de ensamble, se generaron formatos de ayuda visual en donde el operario puede ver la información relacionada al modelo que se está ensamblando, donde se muestra la cantidad de cables balanceadores, calibre de los cables, medida y tipo de voltaje, además de un diagrama donde se muestra una guía de ubicación de cada cable balanceador y las terminales de control con las que cuenta el BMS.

Con esto se buscó reducir las variaciones y los defectos en ubicaciones de instalación, también minimizando accidentes con los operadores. La Ilustración 37 muestra una evidencia de instalación de BMS tomando en cuenta las mejoras aplicadas en el proceso de instalación.



Ilustración 37: Evidencia de instalación de BMS en pack de batería.
Elaboración propia.

En la lista de chequeo presentada en la Ilustración 38 encuentra información referente al voltaje máximo de pack de batería, voltaje nominal, voltaje mínimo y corriente a la que debe funcionar cada modelo de batería; esta información ayuda al operador a comprobar valores de voltaje final al término del ensamble de módulos de celdas y evitar errores en los arreglos de celdas.

Folio:002



T1. Voltaje de referencia para modelos de baterías LiFePO₄.

Modelo	Voltaje mínimo	Voltaje nominal (V)	Voltaje máximo	Corriente (A)
4S1P-LIPS	10 V	12.8 V	15 V	15 A
8S1P-LIPS	20 V	25.6 V	30 V	15 A
12S7P-MINIGOLF	30 V	38.4 V	45 V	105 A
16S1P-SCO	40 V	51.2 V	58.8 V	15 A
16S2P-RACE	40V	51.2 V	58.8 V	20 A
16S3P-RACE	40 V	51.2 V	58.8 V	45 A
16S5P-MINIGOLF	40 V	51.2 V	58.8 V	75 A
16S10P-CARCONV	40 V	51.2 V	58.8 V	150 A
26S2P-MOTO	65 V	83.2 V	97.5 V	30 A

T2. Valores de referencia en voltaje BMS

Modelo	4S1P-LIPS	8S1P-LIPS	12S7P-MINIGOLF	16S1P-SCO	16S2P-RACE	16S3P-RACE	16S5P-MINIGOLF	16S10P-CARCONV	26S2P-MOTO
PIN 1	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V
PIN 2	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V	3.475±0.275 V
PIN 3	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V	6.95±0.275 V
PIN 4	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V	10.425±0.275 V
PIN 5	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V	13.9±0.275 V
PIN 6	-	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V	17.345±0.275 V
PIN 7	-	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V	20.85±0.275 V
PIN 8	-	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V	24.325±0.275 V
PIN 9	-	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V	27.8±0.275 V
PIN 10	-	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V	31.275±0.275 V
PIN 11	-	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V	34.75±0.275 V
PIN 12	-	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V	38.225±0.275 V
PIN 13	-	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V	41.7±0.275 V
PIN 14	-	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V	45.175±0.275 V
PIN 15	-	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V	48.65±0.275 V
PIN 16	-	-	52.125±0.275 V	52.125±0.275 V	52.125±0.275 V	52.125±0.275 V	52.125±0.275 V	52.125±0.275 V	52.125±0.275 V
PIN 17	-	-	55.6±0.275 V	55.6±0.275 V	55.6±0.275 V	55.6±0.275 V	55.6±0.275 V	55.6±0.275 V	55.6±0.275 V
PIN 18	-	-	-	-	-	-	-	-	59.075±0.275 V
PIN 19	-	-	-	-	-	-	-	-	62.55±0.275 V
PIN 20	-	-	-	-	-	-	-	-	66.025±0.275 V
PIN 21	-	-	-	-	-	-	-	-	69.5±0.275 V
PIN 22	-	-	-	-	-	-	-	-	72.975±0.275 V
PIN 23	-	-	-	-	-	-	-	-	76.45±0.275 V
PIN 24	-	-	-	-	-	-	-	-	79.925±0.275 V
PIN 25	-	-	-	-	-	-	-	-	83.4±0.275 V
PIN 26	-	-	-	-	-	-	-	-	86.875±0.275 V
PIN 27	-	-	-	-	-	-	-	-	90.35±0.275 V

Ilustración 38: Lista de chequeo de valores en voltajes de cables balanceadores. Elaboración propia.

La Ilustración 39 muestra la implementación de la lista de chequeo de baterías LiFePO₄. Este documento muestra la verificación de cada punto crítico por parte del supervisor en turno.

Folio:010



LISTA DE CHEQUEO DE INSPECCIÓN DE BATERÍAS LiFePO₄

Almacén	TX1Z-01	Marca	TRONIX TECHNOLOGY	Fecha	05/09/23
Área de Trabajo	Producción	Modelo	16S2P-64CE	C.R.	16S2P19-2

REGULAR=R MAL ESTADO=M BIEN=OK

INSPECCIÓN	OK	R	M	OBSERVACIONES	ACCIONES CORRECTIVAS
Celdas					
Compruebe que las celdas no tienen grietas ni signos de pérdida de electrolito.	/				
Asegúrese de que la celda no esté sucia ni húmeda.	/				
Asegúrese que la tira de níquel esté correctamente soldada a la tira de cobre de la celda.	/				
Asegúrese de que todas las celdas tengan un voltaje similar dentro de los límites especificados en la orden de producción.	/				
Asegúrese que las celdas no tengan golpes significativos que puedan afectar su funcionamiento.	/				
Voltajes					
Comprobar que la batería tenga voltaje terminal (revisar valores de referencia de modelo T1).	/				
BMS					
Verifique que los cables de conexión de la batería a BMS son del tamaño correcto.	/				
Verifique si los cables del BMS no están deshilachados y el aislamiento no está dañado.	/				
Verifique que el voltaje de salida en cada cable del BMS sea correcto (ver tabla de referencias T2).	/				
Comprobar que el Bluetooth y sensor de temperatura estén funcionando correctamente.	/				
Comprobar que la programación de BMS es correcta.	/				
Equalizador					
Verifique que los cables de conexión de la batería a Equalizador son del tamaño correcto.	/				
Monitoree el funcionamiento durante un periodo inicial para asegurarse que el equalizador esté trabajando correctamente.	/				
Verifique que el voltaje de salida en cada cable del equalizador sea correcto (ver tabla de referencias T2).	/				
Caja metálica					
La caja metálica cuenta con asas laterales de transporte manual.	/				
La caja cuenta con código de identificación.	/				
Verifique que no existan abolladuras, grietas o daños visibles en la superficie exterior de la caja metálica.	/				
Verifique que el color y acabado sean uniformes.	/				
La caja cuenta con información referente a valores nominales de la batería.	/				
Empaque de silicon					
Verifique que el empaque de silicon haya sellado herméticamente en la caja metálica.	/				
Empaque de plástico termoadherible					
Asegúrese que no se observen protuberancias de la batería en el empaque.	/				



APROBADO

Nombre y firma del técnico supervisor

Juan Guillermo Acosta Elizalde

Ilustración 39: Implementación de lista de chequeo de baterías LiFePO₄.
Elaboración propia.

4.1.3 Mejora en la soldadura de celdas

Se definieron parámetros estándar de soldadura, incluyendo tiempo y temperatura, y se realizó la calibración del equipo utilizado. Adicionalmente, se reforzó la inspección visual y se promovió la capacitación práctica del personal involucrado en esta etapa del proceso. La Ilustración 40 muestra evidencia del método de soldadura antes de las mejoras implementadas, como se puede observar existen detalles visuales en la calidad de la soldadura que reflejan posibles problemas que pongan en riesgo la integridad de la soldadura y del pack de batería en general.



Ilustración 40: Soldadura de celdas antes de la implementación de mejoras.
Elaboración propia.

La Ilustración 41 muestra evidencia de la implementación de mejoras en el proceso de soldadura, como se puede observar, existe una mejoría drástica en la calidad de la soldadura, esto ayuda a tener uniones seguras entre las celdas sin comprometer la integridad de la soldadura y el pack de batería, eliminando retrabajos por defectos en el proceso.



Ilustración 41: Soldadura de celdas después de la implementación de mejoras.
Elaboración propia.

4.1.4 Mejora en la conexión de módulos e integración del cableado

Para la conexión de módulos y la integración del cableado se implementaron guías visuales y una secuencia estandarizada de ensamble. Se establecieron puntos de verificación intermedios mediante una lista de chequeo para reducir la probabilidad de errores antes de avanzar a la siguiente etapa del proceso. La Ilustración 42 muestra evidencia de las mejoras presentadas en la conexión de módulos e integración de cableado en donde se puede resaltar orden y estandarización de las celdas ensambladas, evidenciando su control de trazabilidad.

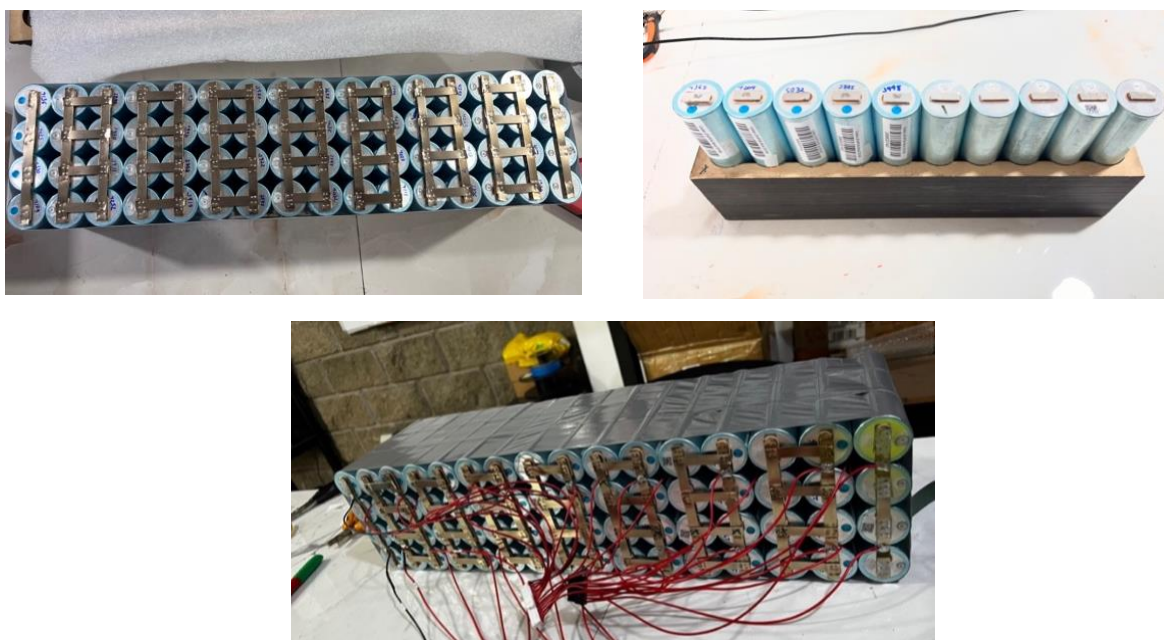


Ilustración 42: Mejora en conexión de módulos e integración de cableado. Elaboración propia.

4.1.5 Mejora en revestimiento de pack de batería

Se estandarizó el procedimiento mediante la elaboración de instrucciones de trabajo y listas de verificación. Mediante esta mejora se buscó eliminar retrabajos por errores en la instalación del plástico termoadherible y problemas por abuso de tiempo y temperatura durante la instalación del plástico, el final del proceso se sugiere que el operario complete la lista de verificación donde señale observaciones presentes en el acabado del plástico y el estado del plástico, dicha información al

final debe ser validada por el supervisor y deberá tener el sello de liberación por el departamento de calidad en la lista de chequeo de baterías LiFePO_4 .

En la Ilustración 43 se muestra evidencia de las mejoras implementadas en el proceso de revestimiento del pack de batería, resaltando que no existen detalles físicos que pongan en riesgo la integridad del pack de batería, como rasgaduras en el material o defectos visuales.



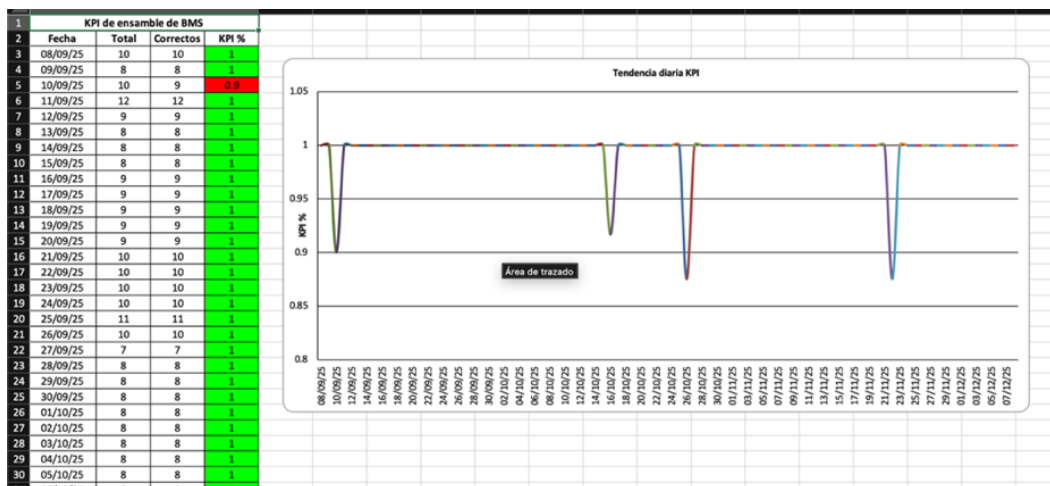
Ilustración 43: Mejora en revestimiento de pack de batería.
Elaboración propia.

4.1.6 Implementación y seguimiento de KPIs

Durante las pruebas piloto se dio seguimiento a los KPIs definidos previamente, los cuales permitieron monitorear el desempeño del proceso y evaluar la efectividad de las mejoras implementadas. Los indicadores fueron registrados de forma periódica y analizados para identificar tendencias y desviaciones en el proceso de ensamble.

Este seguimiento se llevó a cabo durante el periodo comprendido del 8 de septiembre al 8 de diciembre de 2025, posterior a la implementación de las mejoras en el proceso de ensamble de baterías de litio. El objetivo de este análisis fue evaluar la efectividad del sistema de indicadores como herramienta de control y mejora continua del proceso de ensamble de baterías. El seguimiento de los KPIs se realizó mediante un tablero de control generado en Excel, el cual permitió

registrar datos diarios del proceso y calcular automáticamente los indicadores correspondientes. En la Ilustración 44 se muestra evidencia de la implementación de KPIs con ayuda del software Excel.



*Ilustración 44: Implementación de KPI's mediante uso de software Excel.
Elaboración propia.*

Los resultados fueron analizados de manera diaria y consolidados con otro KPI mensualmente para identificar tendencias, estabilidad del proceso y su cumplimiento. Durante el periodo de seguimiento se registraron resultados consistentes que evidencian una mejora significativa en la estabilidad del proceso. A continuación, se presenta una interpretación general de los indicadores monitoreados.

KPI: Configuración correcta del Sistema de Gestión de Baterías (BMS)

Este KPI evalúa la eficacia del proceso de configuración correcta del sistema. Como se observa en el Gráfico 1, en el mes de septiembre se obtuvo un 99.5% de éxito en la configuración. En octubre se registró una ligera disminución del 99.3% que fue atribuible a la curva de adaptación del personal. El personal pudo adaptarse y entender las ayudas visuales y la estandarización del proceso, el KPI recuperó su promedio de cumplimiento nuevamente al 99.5% en noviembre y logró sostenerse en diciembre. Este comportamiento demostró que las herramientas de calidad implementadas lograron estabilizar el proceso.

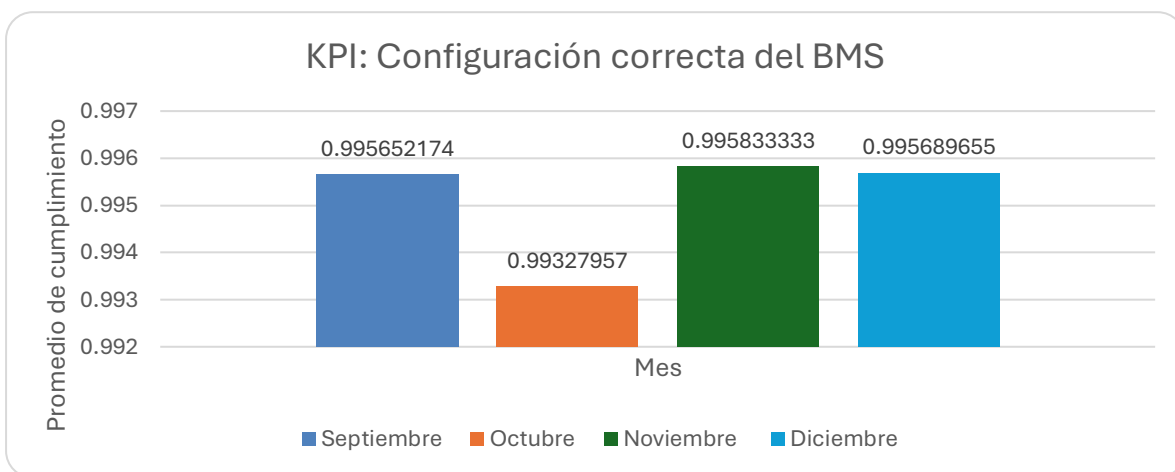


Gráfico 1: KPI de configuración correcta de BMS mensual. Elaboración propia.

KPI: Defectos eléctricos por ensamble

En este KPI se evalúan los módulos de baterías que son integrados exitosamente sin presentar fallas de ensamble. Como se muestra en el Gráfico 2, durante el mes de septiembre se registró un nivel de aceptación del 99%, etapa en la cual se presentó una alta variabilidad. Sin embargo, a medida que los operadores asimilaban las ayudas visuales y los estándares de ensamble, se logró una reducción progresiva de los defectos eléctricos por ensamble. Esto se refleja en el incremento de la confiabilidad eléctrica, el cual pudo subir al 99.3% en octubre, 99.5% en noviembre, hasta alcanzar el 100% de promedio de cumplimiento en el mes de diciembre, logrando así la estabilización total del proceso en este mes.

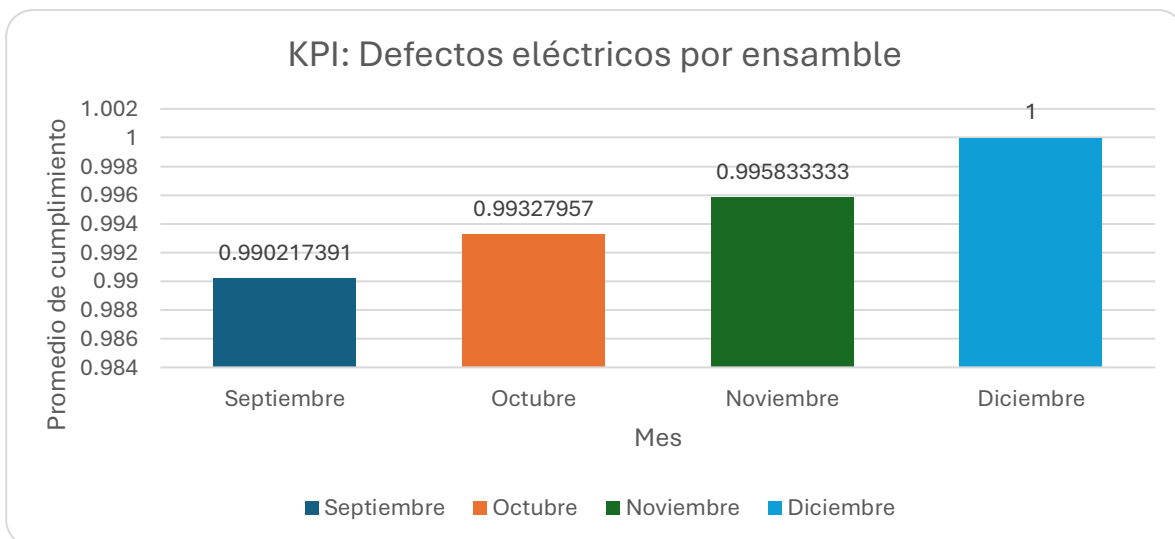


Gráfico 2: KPI de defectos eléctricos por ensamble mensual. Elaboración propia.

KPI: Calidad de soldadura de celdas

En este KPI se evalúa la efectividad y seguridad en la calidad de soldadura de celdas. Como se observa en el Gráfico 3, el porcentaje de calidad en la soldadura de celdas alcanzó un promedio superior al 96% y cumplió con la meta establecida.

Durante el mes de septiembre, el proceso inició con un 94.6%, mostrando una alta variabilidad; después, en octubre, registró una ligera disminución al 94.5%, correspondiente a la adaptación del personal a los nuevos estándares.

Se ejecutaron acciones correctivas inmediatas enfocadas al reforzamiento de la técnica de soldadura con los operadores. Se elevó el indicador al 97.4% en noviembre.

Finalmente, en diciembre se registró un promedio de cumplimiento del 97.1%. El proceso demostró haber superado la variabilidad crítica con una tendencia estable y subiendo la confiabilidad en la soldadura de celdas.

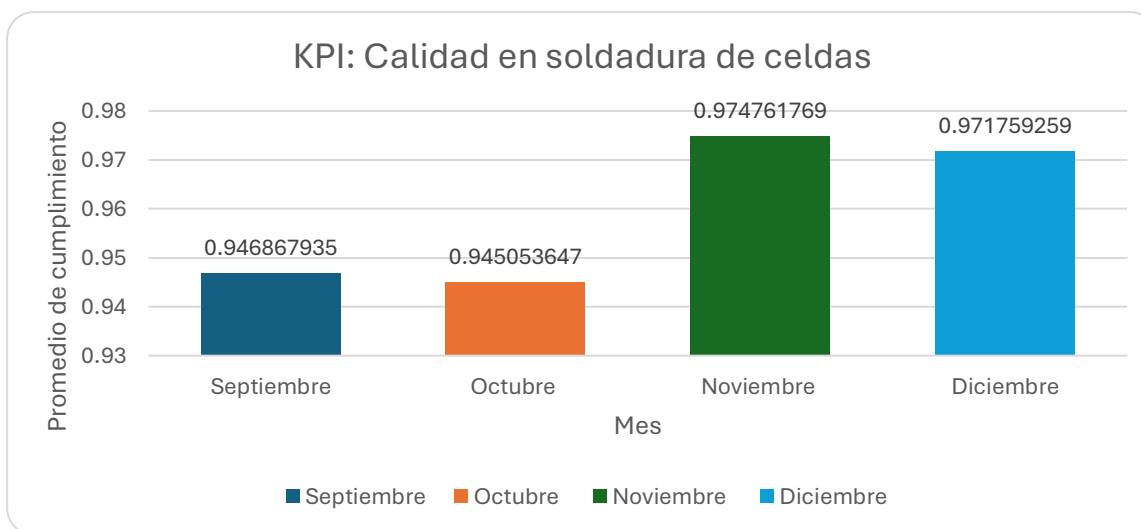


Gráfico 3: KPI de calidad en soldadura de celdas mensual. Elaboración propia.

KPI: Ensamble de módulos sin retrabajo

Como se observa en el Gráfico 4, el ensamble de módulos sin necesidad de retrabajo presentó un desempeño consistente. Durante los meses de septiembre y octubre, el indicador registró un nivel de 99.7%, sin embargo, en noviembre y diciembre, se alcanzaron promedios de cumplimiento del 99.99%, demostrando una reducción alta de los errores humanos y garantizando un flujo confiable en la línea de ensamble.

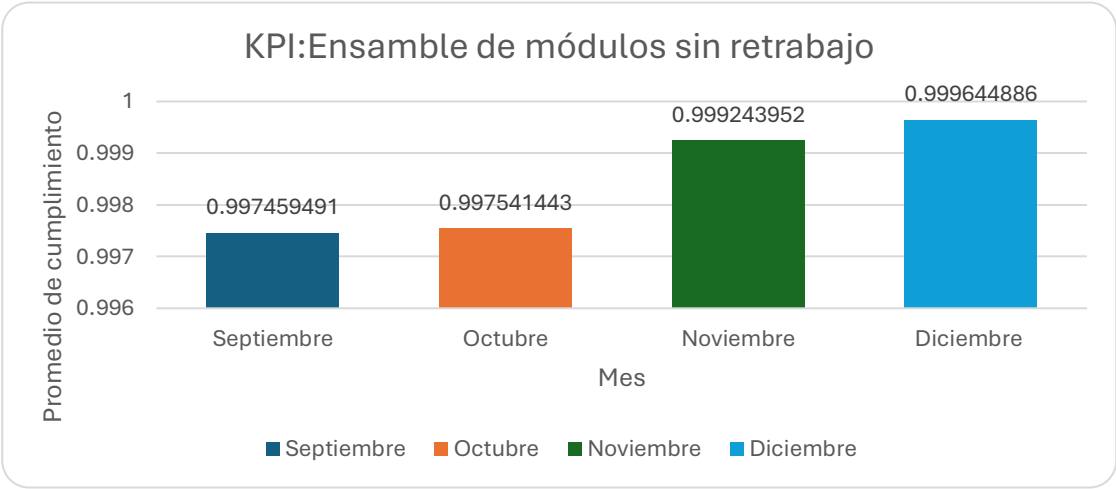


Gráfico 4: KPI de ensamble de módulos sin retrabajo mensual. Elaboración propia.

KPI: Balanceo de celdas previo al ensamble

El KPI correspondiente al balanceo de celdas mostrado en el Gráfico 5 presentó valores del 100 % durante todo el periodo de seguimiento, lo que evidencia una mejora significativa en la selección y preparación de materiales antes del ensamble.

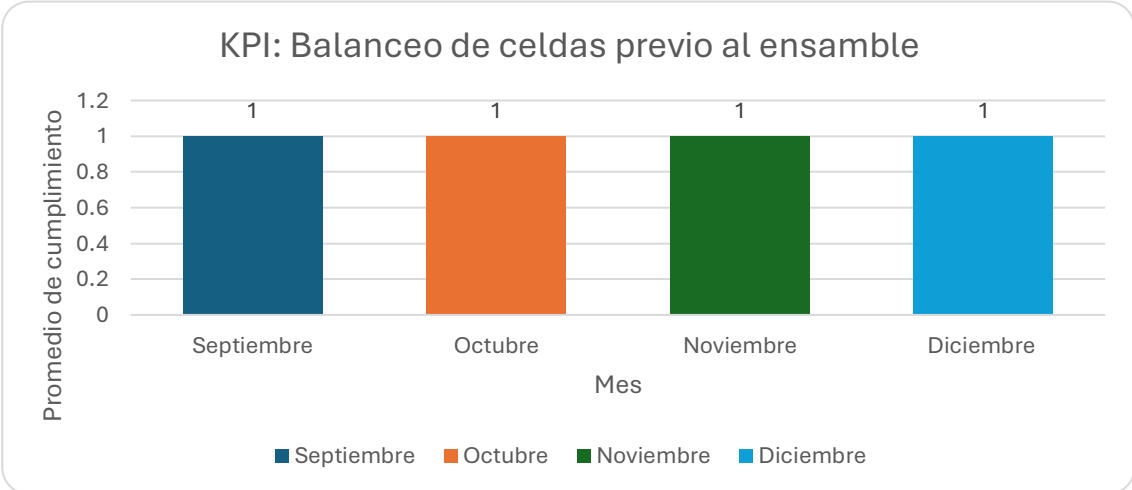


Gráfico 5: KPI de balanceo de celdas previo al ensamble mensual. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de KPIs implementado es efectivo para monitorear el desempeño del proceso y detectar desviaciones de manera oportuna. La mayoría de los indicadores se mantuvieron en estado verde durante el periodo analizado, lo que confirma la estabilidad del proceso posterior a la implementación de las mejoras.

Los KPIs implementados se enfocaron principalmente en el control de la configuración y ensamble del BMS, la reducción de defectos eléctricos, la mejora de la calidad de soldadura, la estabilidad del ensamble de módulos y el control del balanceo de celdas, estableciendo así una relación directa entre los defectos más frecuentes y los indicadores de desempeño monitoreados.

La comparación entre los defectos críticos identificados en el diagrama de Pareto y los resultados obtenidos mediante los KPIs posteriores a la implementación de mejoras demuestra una alineación directa entre el diagnóstico y las acciones correctivas aplicadas.

Las categorías con mayor impacto inicial fueron abordadas mediante indicadores específicos como se muestra en la Tabla 26, lo que permitió reducir su frecuencia y mejorar la estabilidad del proceso.

La disminución de defectos eléctricos confirma la efectividad de los controles implementados en la configuración del BMS y la integración del cableado. De igual manera, la mejora en los KPIs de soldadura y ensamble valida la estandarización de métodos y la capacitación del personal.

Finalmente, el control del balanceo de celdas evidenció una mejora significativa en la gestión de materiales al inicio del proceso de ensamble. Los resultados obtenidos posteriores a la implementación de las mejoras evidencian una reducción significativa de los defectos asociados a las categorías técnicas identificadas como prioritarias definidas en las herramientas de análisis como el

diagrama de Pareto, diagrama Ishikawa y el AMEF. En particular, se observa una mejora significativa en el control de fallas eléctricas, fallas de ensamble o unión y fallas relacionadas con las celdas, especialmente en la disminución del desbalanceo en las celdas, lo cual confirma la efectividad de las acciones implementadas.

Tabla 26: Comparación antes y después de mejoras. Elaboración Propia.

Categoría de Defecto (Pareto)	Situación Inicial (Pre-Mejora)	KPI Asociado	Resultado Post-Implementación (Gráficos 1-5)	Impacto en el Proceso
Fallas Eléctricas	Alta incidencia de BMS mal configurados y cortocircuitos.	% Tasa de defectos eléctricos	Promedio de cumplimiento de hasta el 100% en reducción de fallas en configuración y cableado.	Mayor estabilidad del sistema y seguridad térmica del pack.
Fallas de Ensamble / Unión (Soldadura)	Elevada frecuencia de "soldadura fría" y retrabajos en módulos.	% Módulos sin retrabajo (First Pass Yield)	Eficiencia del 97.1% en soldadura por puntos tras estandarización.	Eliminación de cuellos de botella por retrabajo.
Fallas de Celdas (Balanceo)	Desbalanceo frecuente (>0.05V) antes del ensamble final.	% Celdas balanceadas (SOC)	100% de celdas balanceadas mediante el nuevo protocolo de carga.	Optimización de la vida útil de la batería LiFePO ₄ .
Configuración de BMS	Errores manuales en la carga de parámetros de protección.	% Configuración correcta del BMS	Precisión del 99.5% mediante el uso de la nueva interfaz de software.	Garantía de operación dentro de los límites de seguridad (SOA).
Calidad de Revestimiento	Defectos visuales y falta de adherencia en el termoadherible.	% Defectos en revestimiento	Disminución significativa de mermas por acabado estético.	Mejora en la presentación final y sellado del producto.

4.1.7 Reevaluación de NPR (Número de Prioridad de Riesgo) en AMEF

La reevaluación del análisis AMEF muestra el comportamiento de los NPR después de la aplicación de las acciones preventivas y correctivas. El análisis de los datos confirma una alta disminución de los NPR de las fallas identificadas en el proceso de ensamble de baterías.

Como se observa en la Tabla 27, los errores identificados en la unión de celdas redujeron su NPR de 378 a 54, gracias al control efectivo de los parámetros de soldadura que bajó la ocurrencia a un valor de 2 y mejoró la detección a 3. La integración de cableado logró un descenso de 280 NPR a 32, al implementar diagramas de ruteo y listas de chequeo ayudaron a reducir la ocurrencia y detección a 2, respectivamente. El ensamble de BMS disminuyó con un NPR de 225 a 36.

Tabla 27: Reevaluación de NPR en análisis AMEF. Elaboración propia.

Descripción de la falla	NPR	Acciones recomendadas	Áreas/ Personas responsables	Acción tomada	Severidad (S)	Ocurrencia (O)	Detección (D)	RPN
Problemas de integración electrónica de BMS	225	Pruebas funcionales, Inspección visual Inspección eléctrica Estandarización de proceso	Departamento de calidad Inspector de calidad Personal operativo	Se tomaron las acciones recomendadas	9	2	2	36
Errores en unión de celdas y módulos con tiras de níquel	378	Control de cálculo de número de tiras de níquel ensambladas Control de espesor de láminas de níquel ensambladas Diseño CAD de ensamble de pack de batería Estandarización de proceso	Departamento de calidad Departamento de ingeniería (Diseño) Inspector de calidad Personal operativo	Se tomaron las acciones recomendadas	9	2	3	54
Problemas en punto de soldadura en integración de cableado	280	Inspección visual de orden de cableado Inspección funcional de orden de cableado mediante sumatoria de voltajes Inspección física de soldadura Estandarización de proceso	Departamento de calidad Inspector de calidad Personal operativo	Se tomaron las acciones recomendadas	8	3	3	72
Fallas funcionales y/o físicas de celdas	324	Inspección visual Inspección funcional Estandarización de proceso	Departamento de calidad Inspector de calidad Personal operativo	Se tomaron las acciones recomendadas	9	2	2	36
Problemas de calidad en aplicación de materiales aislantes	90	Control visual Lista de chequeo Estandarización de proceso	Departamento de calidad Inspector de calidad Personal operativo	Se tomaron las acciones recomendadas	9	2	2	36
Problemas en confiabilidad en cierre de pack de batería, inmovilización de batería dentro del pack	40	Inspección visual Lista de chequeo Estandarización de proceso	Departamento de calidad Inspector de calidad Personal operativo	Se tomaron las acciones recomendadas	5	2	2	20

Al estandarizar los procesos de ensamble, se logran alcanzar los puntos exigidos en los **protocolos de certificación de la norma UL 2580**. Además, el sistema de aseguramiento de calidad implementado da cumplimiento al **análisis de riesgos requerido en la norma IEC 62619**, validando que el producto final mantiene un estándar de seguridad apto para aplicaciones de movilidad.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La ejecución de este proyecto permitió la transición de actividades de recibo de materiales y ensamble realizadas de forma empíricas hacia un sistema de gestión de calidad estructurado para baterías LiFePO_4 . Se cumplió el objetivo general en la reducción sistemática de la variabilidad operativa y la seguridad técnica del producto final. Considerando los resultados obtenidos en el periodo de seguimiento del mes de septiembre al mes de diciembre de 2025, se obtuvo lo siguiente:

El diagnóstico identificó áreas de oportunidad en el proceso de ensamble, derivado de procedimientos empíricos y falta de estandarización.

La eficacia de la estandarización permitió alcanzada, del 99.5% en la configuración del BMS, evidencia que el uso de interfaces de software en lugar de registros manuales redujo significativamente el error humano, asegurando que cada unidad opere bajo parámetros de seguridad.

Disminución de defectos críticos, mediante el análisis posterior a la implementación mostró una reducción en fallas eléctricas, logrando un promedio de cumplimiento del 100%. A esto se suma el control total en el balanceo de celdas previo al ensamble, lo que ayuda la confiabilidad del producto, prolonga su vida útil y disminuye costos asociados con retrabajos.

Optimización del proceso de unión, por medio de la estabilización de la soldadura por puntos, alcanzó una eficiencia del 97.1%, confirmando que la capacitación del personal y eliminando al mismo tiempo cuellos de botella identificados en el diagnóstico inicial.

Control mediante indicadores, con el sistema de KPIs funcionó como herramienta de seguimiento, y mecanismo preventivo. El uso de un tablero de

control en Excel permitió detectar desviaciones y aplicar correcciones antes de que el producto avanzara a etapas posteriores.

Recomendaciones para la empresa

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda a la empresa mantener el sistema de indicadores clave de desempeño (KPIs) como herramienta de control del proceso de ensamble de baterías.

El seguimiento continuo de estos indicadores permitirá detectar desviaciones de forma oportuna y mantener la estabilidad del proceso.

Se recomienda formalizar y documentar los procedimientos de ensamble, configuración y ensamble del BMS, clasificación de celdas y de conexión de módulos para asegurar la estandarización del proceso.

Otra recomendación es la actualización periódica del Análisis de Modos y Fallos (AMEF), especialmente cuando se realicen cambios en el diseño del producto o en los materiales utilizados. Esto permitirá mantener una gestión preventiva de futuros riesgos antes de que representen un problema de confiabilidad para el usuario final.

Se sugiere ampliar el sistema de mejora continua a otros procesos de la empresa, como logística, diseño de producto, servicio postventa, aprovechando la metodología desarrollada en este trabajo. La integración de estos procesos al sistema de calidad contribuirá a fortalecer la satisfacción del cliente. Finalmente, se recomienda continuar con la recopilación y análisis de datos históricos del proceso, con el objetivo de alcanzar la implementación de herramientas estadísticas más avanzadas, como el control estadístico del proceso. Esto permitirá a la empresa tomar decisiones con datos.

Referencias bibliográficas

- Anaya, J. J. (2015). Logística integral: la gestión operativa de la empresa (4.^a ed.). ESIC Editorial.
- Carlson, C. S. (2012). *Effective FMEA: Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes using Failure Mode and Effects Analysis*. John Wiley & Sons.
- Crosby, P. B. (1979). *Quality is Free: The Art of Making Quality Certain*. McGraw-Hill.
- De la Torre Dávila, A. Y., Navejas, F. J. H., & Meza, C. P. (2021). Understanding traceability: Its relevance in the adoption of quality and safety measures across the supply chain. *Vinculatégica EFAN*, 7(2), 1102–1113.
- Deming, W. E. (1986). *Out of the Crisis*. Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study.
- Evans, J. R., & Lindsay, W. M. (2020). *Managing for quality and performance excellence* (11th ed.). Cengage Learning.
- George, M. L., Rowlands, D., Price, M., & Maxey, J. (2005). *The Lean Six Sigma pocket toolbox*. McGraw-Hill.
- Heizer, J., & Render, B. (2017). *Operations management: Sustainability and supply chain management* (12th ed.). Pearson.
- IEC 62133-2: Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Safety requirements for portable sealed secondary lithium cells and batteries – Part 2: Lithium systems. IEC.
- IEC 62619: Safety requirements for secondary lithium batteries. IEC.
- International Organization for Standardization. (2015). *Quality management systems Requirements (ISO 9001:2015)*. <https://www.iso.org/standard/62085.html>
- International Electrotechnical Commission. (2017). IEC 62619:2017 - Secondary cells and batteries containing alkaline or other nonacid electrolytes
- International Electrotechnical Commission. (2018). IEC 62660-2:2018 - Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles.

- International Organization for Standardization. (2018). ISO 26262: Road vehicles – Functional safety. ISO.
- Juran, J. M. (1990). Juran on Planning for Quality. Free Press
- Kumar, S., Teichman, S., & Timpernagel, T. (2008). A review of product traceability systems and their implications for regulatory compliance. *Journal of Public Policy & Marketing*, 27(2), 161–174.
<https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1509/jppm.27.2.161>
- Laukkanen, E. (2021). Traceability systems in the manufacturing industry: A systematic literature review. *Nombre de la revista, volumen(número), páginas.*
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/141058/LaukkanenEetu.pdf?sequence=2>
- Liu, H. C. (2016). *FMEA Using Uncertainty Theories and MCDM Methods*. Springer.
- Lv, Y., Geng, X., Luo, W., Chu, T., Li, H., Liu, D., Cheng, H., Chen, J., He, X., & Li, C. (2023). Review on influence factors and prevention control technologies of lithium-ion battery energy storage safety. *Journal of Energy Storage*, 72, 108389. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108389>
- Mineva, D. (2020). Application of the Pareto Principle in the Economic and Health Sectors - A Brief Review and Example of COVID-19. *Knowledge - International Journal*, 143-147.
- Moe, T. (1998). Perspectives on traceability in food manufacture. *Trends in Food Science & Technology*, 9(5), 211–214. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(98\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(98)00037-5)
- Mora, L. A. (2015). Gestión logística integral: las mejores prácticas en la cadena de abastecimiento. Ecoe Ediciones.
- Parmenter, D. (2015). *Indicadores Clave de Desempeño: Desarrollando, implementando y usando KPIs ganadores* (3ra ed.). John Wiley & Sons.
- Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2018). The Six Sigma handbook (5th ed.). McGraw-Hill Education.

- Rosen, M. A., & Farsi, A. (2023). Battery system design. En M. A. Rosen & A. Farsi (Eds.), *Battery Technology* (pp. 161-198). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18862-6.00006-9>
- SAE International. (2019). SAE J2929/1:2019 - Electric and Hybrid Vehicle Propulsion Battery System Safety Standard - Lithium-based Rechargeable Cells.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution* (2da ed.). ASQ Quality Press.
- UL Standards. (2018). UL 1973 - Standard for Batteries for Use in Stationary, Vehicle Auxiliary Power and Light Electric Rail (LER) Applications.
- UL Standards. (2020). UL 2580 - Standard for Safety for Batteries for Use in Electric Vehicles.
- Underwriters Laboratories. (2020). UL 2580: Standard for batteries for use in electric vehicles. UL Standards.
- Wang, S., Fan, Y., Stroe, D.-I., Fernandez, C., Yu, C., Cao, W., & Chen, Z. (2021). Battery system active control strategies. En S. Wang, Y. Fan, D.-I. Stroe, C. Fernandez, C. Yu, W. Cao, & Z. Chen (Eds.), *Battery System Modeling* (pp. 313-340). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90472-8.00006-8>
- Yuan, L. X., Wang, Z. H., Zhang, W. X., Hu, X. L., Chen, J. T., Huang, Y. H., & Goodenough, J. B. (2011). Development and challenges of LiFePO₄ cathode material for lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 4(2), 269-284.
- Zhang, Y., Wang, M., Wu, G., Xu, Z., & Shen, Y. (2023). State of Charge Estimation of LiFePO₄ in Various Temperature Scenarios. *Batteries*, 9(1), 43. <https://doi.org/10.3390/batteries9010043>.
- Zhao, Q. F., Zhang, S. Q., Hu, M. Y., Wang, C., & Jiang, G. H. (2021). Recent advances in LiFePO₄ cathode materials for lithium-ion batteries. First-principles research. *International Journal of Electrochemical Science*, 16(12), 211226.