

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TIJUANA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS CIBER-FÍSICOS DE LA  
INDUSTRIA 4.0 EN LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO  
DE CELDAS SOLARES

TRABAJO DE TESIS PRESENTADO POR  
M.C. JORGE LUIS ALONSO PÉREZ

PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

BAJO LA DIRECCIÓN DE  
DR. EDGAR ALONSO REYNOSO SOTO  
Y LA CODIRECCIÓN DE  
DR. NOHÉ RAMÓN CÁZAREZ CASTRO





Tijuana Baja California, 15/Junio/2021  
Asunto: Autorización de impresión de trabajo de tesis

**DRA. YAZMIN MALDONADO ROBLES**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**PRESENTE**

En lo referente al trabajo de tesis, "Implementación de sistemas ciber-físicos de la Industria 4.0 en la investigación y desarrollo de celdas solares", presentado por el M.C. Jorge Luis Alonso Pérez, alumno del programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, con número de control D14212371; informamos a usted que después de una minuciosa revisión e intercambio de opiniones, los miembros del comité manifiestan **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias, por lo que se autoriza al interesado para que proceda de inmediato a la impresión del mismo.

**A T E N T A M E N T E**  
*Excelencia en Educación Tecnológica*  
*Por una juventud integrada al desarrollo de México*

**DR. EDGAR ALONSO REYNOSO SOTO**  
**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. NOHÉ RAMÓN CÁZAREZ CASTRO**  
**CO-DIRECTOR DE TESIS**

**DRA. SELENE LILETTE CÁRDENAS MACIEL**  
**MIEMBRO DEL COMITÉ**

**DRA. CECILIA LEAL RAMÍREZ**  
**MIEMBRO DEL COMITÉ**

**DR. JOSÉ MARIO GARCÍA VALDEZ**  
**MIEMBRO DEL COMITÉ**

**DR. LUIS NÉSTOR CORIA DE LOS RÍOS**  
**MIEMBRO DEL COMITÉ**

ccp. Archivo  
Dr. José Ricardo Cárdenas Valdez - Coordinador Académico del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.





Instituto Tecnológico de Tijuana

Tijuana, Baja California, 09/agosto/2021  
OFICIO No. 080/DEPI/2021  
Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

**MARIBEL GUERRERO LUIS**  
**JEFA DEL DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ESCOLARES**  
**PRESENTE**

En lo referente al trabajo de tesis, "Implementación de sistemas ciber-físicos de la industria 4.0 en la investigación y desarrollo de celdas solares". Presentado por C. Jorge Luis Alonso Pérez, alumno del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería con número de control D14212371; informo a usted que, a solicitud del comité tutorial, tengo a bien Autorizar la impresión de Tesis, atendiendo las disposiciones de los Lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado del Tecnológico Nacional de México.

Sin más por el momento le envío un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®  
Por una juventud integrada al desarrollo de México®*

 **EDUCACIÓN** |   
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TIJUANA**  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
E INVESTIGACIÓN

**YAZMIN MALDONADO ROBLES**  
**JEFA DE DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

ccp. Archivo  
YMR



Calzada del Tecnológico S/N Esq. Av. Castillo de Chapultepec y calle Cuauhtemotzin, Fracc. Tomás Aquino C.P. 22414, Tijuana, Baja California. (664) 6078400 Ext. 101 / e-mail: dir\_tijuana@tecnm.mx  
tecnm.mx | tijuana.tecnm.mx





### CARTA DE CESION DE DERECHOS

En la ciudad de Tijuana, Baja California, el día **02** del mes de **agosto** del año **2021**, el que suscribe **Jorge Luis Alonso Pérez**, con número de control **D14212371**, alumno de **Doctorado** del programa de Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Edgar Alonso Reynoso Soto** cede los derechos del trabajo titulado **'Implementación de sistemas ciber-físicos de la industria 4.0 en la investigación y desarrollo de celdas solares'** al Tecnológico Nacional de México para su difusión, con fines académicos y de investigación en la comunidad estudiantil y científica del país.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas, código, formulas o datos del trabajo sin permiso expreso del autor o director del trabajo. Este debe ser obtenido escribiendo a cualquiera de las siguientes direcciones de correo electrónico **jalonso@tectijuana.edu.mx** y **edgar.reynoso@tectijuana.edu.mx** o bien, dirigirse a las instalaciones del Instituto Tecnológico de Tijuana en Calzada del Tecnológico S/N Esq. Av. Castillo de Chapultepec y calle Cuauhtemotzin, Fracc. Tomás Aquino C.P. 22414, Tijuana, Baja California, conmutador 664-6078400.

Si se otorga el permiso, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo como lo indique el autor intelectual o el director del trabajo de Tesis.

**A T E N T A M E N T E**

**JORGE LUIS ALONSO PÉREZ**  
**ALUMNO DEL POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**





# Derechos de autor

M.C. JORGE LUIS ALONSO PÉREZ  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TIJUANA  
Tijuana Baja California, México  
2021



# Dedicatorias

A mi familia por el apoyo que me dieron durante toda mi carrera para lograr terminarla, estando conmigo en todo momento y en cualquier situación en donde necesitaba algún consejo para tomar alguna decisión importante.

A mi comité de tesis, a mis maestros, mis compañeros y amigos, que con sus enseñanzas me guiaron para adquirir conocimiento, llevándolos a cabo en mi desarrollo académico y profesional.



# Agradecimientos

Se agradece el apoyo brindado por el CONACYT para la realización de estudios de postgrado (No. Registro Becario: 602039) y se le agradece a CONACYT por la beca de manutención . Asimismo, el suscrito agradece al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, al comité de tesis y a los maestros por el apoyo brindado para la realización de estos estudios y el desarrollo de esta investigación con el financiamiento (PN-92-2015), (5625.15-P y 6177.17-P), (511-6/17-8768), (11122.21-P), (5564.19-P) y (PN-2015-92) respectivamente.



# Reconocimientos institucionales

El presente trabajo se desarrolló en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, bajo la dirección del Dr. Edgar Alonso Reynoso Soto y la codirección del Dr. Nohé Ramón Cázarez. Se agradece el apoyo brindado por el CONACYT para la realización de estudios de postgrado, beca de manutención (No. Registro Becario: 602039) y el desarrollo de esta investigación. Asimismo, el suscrito agradece al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, al comité de tesis y a los maestros por el apoyo brindado para la realización de estos estudios y el desarrollo de esta investigación con el financiamiento (PN-92-2015), (5625.15-P y 6177.17-P), (511-6/17-8768), (11122.21-P), (5564.19-P) y (PN-2015-92) respectivamente.



# Implementación de sistemas ciberfísicos de la industria 4.0 en la investigación y desarrollo de celdas solares

## Resumen

**Introducción:** El proceso de escalamiento de laboratorio a fabricación industrial de las celdas solares de películas delgadas sensibilizadas por colorante de tercera generación, necesita una plataforma de procesamiento en el diseño, fabricación y prueba de la línea de producción. Esta plataforma podría facilitar la integración e interoperabilidad de equipos de deposición, procesamiento y caracterización de celdas solares de tercera generación.

**Metodología:** El proceso de producción de celdas solares de películas delgadas fue investigado, específicamente celdas solares sensibilizadas por colorante. La Arquitectura de Referencia de Internet Industrial (IIRA, por sus siglas en inglés) se implementó para la investigación y desarrollo de la producción de celdas solares de películas delgadas, y sincronizar y gestionar los procesos de producción reales, virtuales o híbridos, en un ambiente de módulos de fábrica de aprendizaje en el Instituto Tecnológico de Tijuana.

**Resultados:** El diseño y conceptualización del módulo de fabricación de aprendizaje ahora cuenta con una arquitectura de referencia para la estandarización global de recursos y procesos de producción. El proceso multidisciplinario de implementación de un modelo de arquitectura de referencia, fue exitoso como punto de partida para el desarrollo de un escenario de investigación y desarrollo de una línea de producción de celdas solares de películas delgadas, específicamente celdas solares sensibilizadas por colorante (CSSC) y su relación con un método automático de deposición por rocío pirolítico. Esta tesis ilustra el ciclo de vida del producto que comienza con la generación de conocimiento en un laboratorio de investigación y desarrollo multidisciplinario y concluye con un producto

en forma de módulo de fábrica de aprendizaje.

**Conclusiones:** La investigación y el desarrollo del proceso de escalamiento de las celdas solares de tercera generación, puede beneficiarse de las tendencias y tecnologías emergentes relacionadas con el Internet industrial de las cosas y la industria 4.0. Sin embargo, para migrar los productos fotovoltaicos de laboratorio y pequeña escala, a una versión más grande de escala industrial, se necesita una plataforma de procesamiento en el diseño, fabricación y prueba de la línea de producción. En esta tesis, después de una breve introducción del proceso de producción de celdas solares de películas delgadas, específicamente CSSC, IIRA se ha implementado al escenario de investigación y desarrollo para la producción de celdas solares de películas delgadas. La implementación de IIRA es una opción confiable para la colaboración multidisciplinaria y para una mayor investigación y capacitación en tecnologías y métodos novedosos, que podrían ayudar a optimizar y escalar el proceso de producción de nueva generación de celdas solares, en particular CSSC.

**Palabras clave:** Celdas solares de película delgada, manufactura de CSSC, Industria 4.0 IIoT, IIRA, Modulo de fabrica de aprendizaje, Análisis en Big Data.

# Publicaciones producto de la tesis:

- Alonso-Perez, J.L., Reynoso-Soto, E.A., Trujillo-Navarrete, B., Cazarez-Castro, N.R. (2016). Fabricación automatizada de películas delgadas compactas en el desarrollo de celdas solares tipo grätzel. *Revista de Tecnología e Innovación* 4, 36 – 42.
- Alonso-Perez,J.L., Cazarez-Castro,E.A., and Reynoso-Soto,E.A. (2018). Analizando el middleware ROS para una posible implementación en un sistema basado en cloud computing. *Avances Científicos y Tecnológicos de las Aplicaciones de las Redes de Computadoras*: p. 46 *Conferencia Internacional en Aplicaciones de las Redes de Computadoras*.
- Matias-Dominguez,D., Cazarez-Castro,N., Martinez-Graciliano,A., Cardenas-Maciel,S., Alonso-Perez, J.L. (2018). Propuesta de una arquitectura distribuida orientada a servicios para la adopción de la industria 4.0 en la manufactura de celdas solares. *Conference: V Congreso Internacional de Robotica y Control*. At: Los Cabos, Baja California Sur, Mexico
- Alonso-Perez, J.L., Cardenas-Maciel, S., Trujillo-Navarrete, B., Reynoso-Soto, E.A., Cazarez-Cazarez, N.R. (accepted for publication). An approach for designing smart manufacturing for the research and development of dye-sensitize solar cell. *Journal of Intelligent Manufacturing*.



# Contenido

Hoja de Aprobación	i
Derechos de Autor	ii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	vi
Reconocimientos Institucionales	viii
Resumen	x
Publicaciones producto de la tesis	xiii
Lista de abreviaturas	xix
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Justificación y Objetivos</b>	<b>5</b>
2.1. Justificación . . . . .	5
2.1.1. Películas delgadas . . . . .	5
2.1.2. Celdas solares de películas delgadas . . . . .	6
2.1.3. Migración lab-to-fab de celdas solares de película delgada . . . . .	7
2.1.4. Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante (CSSC) . . . . .	8
2.2. Objetivo general . . . . .	9
2.3. Objetivos específicos . . . . .	9
<b>3. Método de deposición por rocío pirolítico</b>	<b>11</b>
<b>4. Tecnología Big Data en la manufactura</b>	<b>15</b>

---

<b>5. Módulos de fábrica de aprendizaje</b>	<b>17</b>
<b>6. Modelos de arquitecturas de referencia</b>	<b>19</b>
<b>7. Metodología para implementar manufactura de CSSC</b>	<b>23</b>
7.1. Procesamiento de CSSC . . . . .	23
7.1.1. Preparación del ánodo . . . . .	23
7.1.2. Preparación del cátodo . . . . .	26
7.1.3. Ensamblaje de CSSC . . . . .	26
7.2. Metodología de IIRA . . . . .	26
7.2.1. Punto de vista empresarial . . . . .	27
7.2.2. Punto de vista de uso . . . . .	28
7.2.3. Punto de vista funcional . . . . .	29
7.2.4. Punto de vista de implementación . . . . .	31
<b>8. Resultados</b>	<b>33</b>
8.1. Implementación de IIRA . . . . .	33
8.1.1. Revisión de los requisitos para la arquitectura del sistema . . . . .	33
8.1.2. Punto de vista empresarial . . . . .	33
8.1.3. Punto de vista de uso . . . . .	34
8.1.4. Punto de vista funcional . . . . .	36
8.1.5. Punto de vista de implementación . . . . .	38
<b>9. Discusión</b>	<b>43</b>
<b>10. Conclusión</b>	<b>45</b>
10.0.1. Trabajo a Futuro . . . . .	46
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>47</b>

# Índice de figuras

2.1. Distintos métodos de fabricación de películas delgadas . . . . .	6
2.2. Diagrama CSSC . . . . .	9
3.1. Elementos del equipo del método de deposición por rocío pirolítico . . . . .	12
3.2. Ejemplo de sistemas de deposición por rocío . . . . .	13
3.3. Sistema automático de deposición por rocío . . . . .	14
4.1. Cuatro niveles de análisis de datos . . . . .	16
6.1. Distintas capas de IIRA . . . . .	19
6.2. Rami4-0 . . . . .	20
7.1. Secuencia de procesamiento para la fabricación de CSSC . . . . .	24
7.2. Sistema para la deposición por rocío (prototipo) . . . . .	25
7.3. Distintas capas de IIRA . . . . .	27
8.1. Escenario de desarrollo de investigación y desarrollo del ciclo de vida del producto . . . . .	35
8.2. Mapeo analítico del punto de vista funcional IIRA . . . . .	36
8.3. Arquitectura del sistema aplicada módulo de fábrica de aprendizaje . . . . .	39



# Lista de abreviaturas

<b>a-Si</b>	Amorphous silicon	Silicio amorfo
<b>APIs</b>	Application Programming Interfaces Architecture	Interfaces de programación de aplicaciones
<b>CdTe</b>	Cadmium telluride	Teluro Cadmio
<b>CIGS</b>	Copper indium gallium selenide	Cobre Indio Galio y Seleniuro
<b>CV</b>	Virtual commissioning	Comisión Virtual
<b>CSSC</b>	Dye Sensitized Solar Cells	Celda solar sensibilizadas por colorante
<b>ERP</b>	Enterprise Resource Planning	Planeación de recursos empresariales
<b>GaAs</b>	Gallium arsenide	Arseniuro de Galio
<b>HIL</b>	Hardware In-the Loop	Hardware en lazo cerrado
<b>HMR</b>	Human Resource Management	Gestión de recursos humanos
<b>I&amp;D</b>	Research and Development	Investigación y Desarrollo
<b>IaaS</b>	Infrastructure as a Service	Infraestructura como servicio
<b>IIC</b>	Industrial Internet Consortium	Consorcio del Internet Industrial
<b>IIoT</b>	Industrial Internet of Things	Internet industrial de las cosas
<b>IIRA</b>	Industrial Internet Reference Architecture	Arquitectura de referencia del Internet industrial
<b>ITT</b>	Tijuana Institute of Technology	Instituto Tecnológico de Tijuana
<b>Lab-to-Fab</b>	Laboratory to Fabrication	Migración de entre escala de laboratorio a nivel industrial
<b>MES</b>	Manufacturing Execution Systems	Sistemas de ejecución de fabricación
<b>NREL</b>	National Renewable Energy Laboratory	Laboratorio Nacional de Energías Renovables
<b>PaaS</b>	Platform as a Service	Plataforma como servicio

<b>PLM</b>	Product Lifecycle Management	Gestión del ciclo de vida del producto
<b>RAMI 4.0</b>	Reference Architectural Model Industry 4.0	Modelo arquitectónico de referencia Industry 4.0
<b>SaaS</b>	Software as a Service	Software como servicio
<b>SGAM</b>	Smart Grid Architecture Model	Modelo de arquitectura de red inteligente
<b>SIL</b>	Software In-the Loop	Software en lazo cerrado
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silicon dioxide	Dióxido de Silicio
<b>SnO<sub>2</sub>:F</b>	Fluorine-doped Tin Oxide	Óxido de estaño dopado con flúor
<b>TiCl<sub>4</sub></b>	Titanium tetrachloride	Tetracloruro de Titanio
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Titanium dioxide	Dioxido Titanio
<b>UIs</b>	Interfaces de usuario	User Interfaces
<b>UV-O<sub>3</sub></b>	Ozone irradiated whit ultra-violet rays	Ozono irradiado con rayos ultravioletas

# Capítulo 1

## Introducción

La reducción del costo y el incremento de la eficiencia de las celdas solares de tercera generación (Celdas solares sensibilizadas por colorante (CSSC), celdas solares orgánicas, perovskita, etc.), han llevado a una creciente necesidad a nivel mundial en la Investigación y Desarrollo (I&D) de la migración de escala de laboratorio a escala a nivel industrial en la fabricación (lab-to-fab). Aunque numerosos autores están contribuyendo a la I&D en el proceso de escalamiento de equipos y métodos de deposición, procesamiento y caracterización para la fabricación de celdas solares de película delgada, la infraestructura de información detrás de la migración lab-to-fab requiere enfoques novedosos basados en tecnologías de la información aplicadas a sistemas de automatización industriales. De hecho, este es uno de los mayores desafíos de la industria 4.0, específicamente el internet industrial de las cosas (IIoT, por sus siglas en inglés) [1], donde los sistemas ciber-físicos y el análisis de Big data se sincronizan a través de dispositivos y procesos reales y virtuales.

El Instituto Tecnológico de Tijuana necesita desarrollar una infraestructura que permita incrementar la integración e interoperabilidad de equipos virtuales y reales para la fabricación de celdas solares de películas delgada, con el fin de tener mayor acceso a datos relevantes que son difíciles de obtener o sincronizar con los equipos existentes del laboratorio. Como ejemplo, en los diferentes pasos de la fabricación artesanal de CSSC, como se muestra en la Tabla 1.1. A pesar de que el equipo contiene una adecuada instrumentación (caracterización de muestras, medición de temperatura y presión, control de procesos, etc.) el problema principal es la dificultad de extraer los datos y sincronizarlos entre todos los equipos existentes del laboratorio, porque algunos se controlan manualmente y otros están controlados por computadora, pero tienen el software propietario restringido.

**Tabla 1.1:** Datos relevantes de las etapas de fabricación de procesamiento de CSSC. Fuente: Autores.

Componente	Pasos de procesamiento	Datos relevantes
<b>Foto-ánodo</b>	Limpieza de vidrio conductor	Parámetros de deposición
	Deposición de TiO <sub>2</sub>	Tratamiento térmico
	Tratamiento térmico	Caracterización de películas delgadas
	Sensibilizante	
<b>Foto-cátodo</b>	Perforación de vidrio	Parámetros de perforación
	Limpieza de vidrio conductor	Parámetros de deposición
	Deposición de catalizador	Temperatura de proceso
	Tratamiento térmico	Caracterización de película delgada
<b>Celda solar</b>	Montaje y sellado de celda solar	Process temperature
	Inyección de electrolitos	Presión de ensamblaje
	Sellado de orificios de fotocátodo	Flujo de Inyección de electrolito
		Parámetros de llenado al vacío
		Factor de llenado
		Eficiencia

- La infraestructura tendrá las siguientes características:
  1. Módulos de fábricas de aprendizaje que serán virtuales, reales o híbridos.
  2. Gestión de datos heterogéneos provenientes de múltiples fuentes.
  3. Análisis de datos diversificados (transmisión en tiempo real y procesamiento por lotes fuera de línea).
  4. Gestión de usuarios a través de aplicaciones en computadoras y dispositivos móviles.

Los sistemas de producción ciber-físicos simplifican la integración, el ajuste y la sustitución de las unidades de producción que tienen la necesidad de ampliarse o reducirse en caso de ajustes imprevistos de los requerimientos de producción relacionados con nuevos procesos o como contramedidas a interrupciones y fallas [2]. Los sistemas de producción ciber-físicos tienen como finalidad sincronizar la planificación y el control de las operaciones de fabricación entre el mundo físico y virtual, utilizando tecnologías como Cloud Computing y Big Data Analytics [3]. El diseño de módulos de fábricas de aprendizaje surge como un nuevo desafío, dada la necesidad de representar entornos estables para desarrollar y evaluar ideas y tecnologías relacionadas con sistemas de producción

ciber-físicos, a fin de permitir una rápida configuración de diferentes representaciones de estructuras de procesos de fabricación, teniendo en cuenta restricciones de tiempo y recursos materiales y humanos [4].

La Arquitectura de Referencia del Internet Industrial (IIRA, por sus siglas en inglés) y el Modelo Arquitectónico de Referencia Industria 4.0 (RAMI 4.0, por sus siglas en inglés), son dos de los principales sistemas de estandarización y tienen similitudes conceptuales para modelar arquitecturas de internet industrial. A pesar de que se han creado de manera independiente en distintos países, comparten el mismo objetivo de sincronizar el mundo físico y digital de los sistemas de automatización industrial [5, 6]. Dado que el diseño de módulos de fábricas de aprendizaje basado en modelos de referencia de arquitectura como IIRA y RAMI 4.0 podría convertirse en la base de innovadores sistemas de producción ciber-físicos, su futuro papel en el escalamiento de celdas solares de película delgada debe investigarse adecuadamente, ya que sus aplicaciones en investigación y capacitación de tendencias y tecnologías emergentes podría representar un papel de gran importancia.

A pesar del incremento en la cantidad de literatura científica sobre el proceso de escalamiento de celdas solares de películas delgadas y en sistemas de producción ciber-físicos, hasta el momento, se ha prestado muy poca atención en un enfoque integral de estos dos campos de investigación aplicados a la migración lab-to-fab de celdas solares de películas delgadas. La importancia y originalidad de este estudio radica en la exploración de la implementación de un novedoso modelo de arquitectura de referencia en una plataforma para un módulo de fábrica de aprendizaje, con el objetivo de explorar tendencias y tecnologías emergentes relacionadas con el IIoT y la industria 4.0, con el fin de avanzar en la investigación y desarrollo de la migración de lab-to-fab de celdas solares de películas delgadas.

Por lo tanto, el objetivo de esta tesis radica en la propuesta de un modelo de referencia de una arquitectura enfocado a la fabricación de CSSC, con el fin de incrementar el conocimiento del proceso de escalamiento para la migración lab-to-fab de celdas solares de películas delgadas, en un contexto de IIoT e industria 4.0. Para ello, en esta tesis se proponen las bases para el desarrollo de una plataforma de módulos de fábricas de aprendizaje, para futuras investigaciones y capacitación en nuevas tendencias y tecnologías (Sistemas de producción ciber-físicos, Big Data Analytics, Cloud Computing, Comisión Virtual) aplicadas a la fabricación de celda solares de películas delgadas.

Esto ayudará a incrementar la integración e interoperabilidad de equipos de fabricación reales, virtuales o híbridos en procesos de deposición, procesamiento y caracterización. Específicamente se implementó IIRA en un entorno de colaboración multidisciplinar, como punto de partida para la conceptualización y diseño de una plataforma de módulos de fábricas de aprendizaje. Tomando como base la investigación en la literatura hasta el momento de la escritura de esta tesis, se puede mencionar que IIRA no ha sido aplicado a la I&D del proceso de escalamiento de celdas solares de películas delgadas de tercera generación, en particular CSSC.

El contenido de esta tesis se describe a continuación. En la Sección 2 presentan la justificación y objetivos de esta tesis. En la sección 3 se presenta el caso de estudio del método de deposición por rocío pirolítico. En la sección 4 se describen las tecnologías de Big Data en la manufactura. En la sección 5 se describen los módulos de fábrica de aprendizaje. En la sección 6 se describen modelos de arquitecturas de referencia. En la sección 7 se presenta la metodología para implementar una arquitectura para desarrollo de la manufactura de CSSC. En la sección 8 se presentan resultados de esta tesis. Finalmente en la sección 9 y 10 se presentan la discusión y las conclusiones de esta tesis.

# Capítulo 2

## Justificación y Objetivos

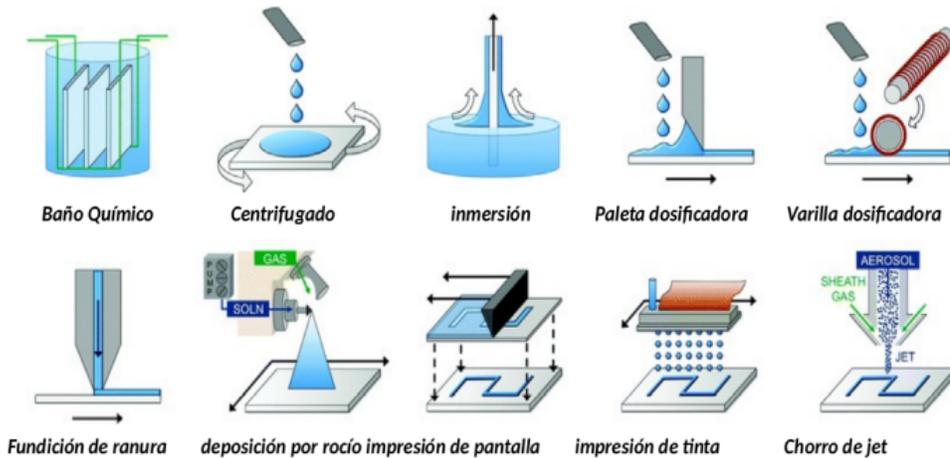
### 2.1. Justificación

El Instituto Tecnológico de Tijuana se esfuerza por ser una institución innovadora tanto en el desarrollo de productos y en la producción de celdas solares de película delgada. A la luz de la actual digitalización de los sistemas de producción industrial, el Instituto Tecnológico de Tijuana busca investigar las oportunidades con los paradigmas de IIoT e Industria 4.0. Este trabajo aspira a poder avanzar en la colaboración multidisciplinaria en la investigación y desarrollo en las áreas de sistemas de producción ciber-físicos y celdas solares de película delgada.

#### 2.1.1. Películas delgadas

Las películas delgadas juegan un papel importante en muchas áreas, tales como la microelectrónica y la nanoelectrónica, construcción de semiconductores, maquinaria, robótica, coches y aviones, etc. Representan la interfaz entre el producto y el medio ambiente. Proporcionan propiedades importantes tales como conducción, aislamiento, anticorrosión, auto-limpieza, y resistencia a rayaduras, etc. Las películas delgadas tienen un espesor de 10 nanómetros a 1 micrómetro [7].

Para el proceso de fabricación existen una gran variedad de métodos (ver Figura 2.1), por ejemplo, deposición electroquímica [8] deposición por vacío [9] deposición por centrifugación [10], método de bisturí (doctor blade) [11] y métodos de rocío pirolítico [12], entre otros. Algunos de estos métodos presentan la desventaja de que requieren maquinaria muy sofisticada y costosa, además de que el proceso de escalamiento está limitado a las dimensiones de las cámaras o dispositivos.



**Figura 2.1:** Distintos métodos de fabricación de películas delgadas.

### 2.1.2. Celdas solares de películas delgadas

Actualmente, las celdas solares en el mercado utilizan una gama de materiales diversos con diferente grado de madurez comercial. Las diferencias han permitido precisar tres generaciones de celdas solares [13] :

La primera generación fue introducida en la década de 1950, se caracterizan por utilizar monocristales de óxido silicio ( $\text{SiO}_2$ ). La eficiencia media de los módulos comerciales es de alrededor del 16 %, con una vida útil de aproximadamente 20 años [14, 15] El inconveniente principal es el uso de láminas de  $\text{SiO}_2$  con un alto grado de pureza que requieren altas temperaturas ( $> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e instalaciones al vacío. Estas características ocasionan el incremento de los costos de fabricación [16].

La segunda generación está basada en el uso de películas delgadas de silicio amorfo (a-Si), seleniuro de cobre indio-galio (CIGS), telurio de cadmio (Cd-Te) o arseniuro de galio (GaAs). La película se deposita sobre un sustrato (vidrio, polímero o metal) y el espesor de la película se encuentra en un rango de 1 a 4 micrómetros. La eficiencia de estas celdas solares oscila entre 7 % (a-Si) y 16,3 % (CdTe) [15, 17]. Los costos de fabricación son menores debido a la cantidad menor de material empleado [13, 14]. Sin embargo, el uso de elementos químicos como Cadmio, Indio y Arsénico aumenta su toxicidad, lo que supone un riesgo para la salud y el ambiente [15].

Finalmente, la tercera generación son celdas solares que aún están en fase de desarrollo [18, 19]. Dentro de las cuales sobresalen las celdas solares tipo orgánicas, de perovskita y Grätzel (también conocidas como celda solar sensibilizada con colorante). La manufactura de celdas solares de tercera generación es un área de investigación con diversos retos, tales como la disminución de los costos de fabricación, la obtención de eficiencias mayores, la simplificación de manufactura y la producción en serie.

### **2.1.3. Migración lab-to-fab de celdas solares de película delgada**

La tercera generación de celdas solares de películas delgadas, tienen el potencial de revolucionar el sector energético debido a su bajo costo y alta eficiencia, en comparación con generaciones anteriores de celdas solares. La razón de esto, es por que se fabrican con materias primas que son abundantes y de bajo costo, se fabrican a presión atmosférica y baja temperatura, adicionalmente son compatibles con sustratos flexibles y métodos de deposición de gran superficie [20, 21].

El rendimiento de las celdas solares de películas delgadas depende en gran medida de la combinación adecuada de distintos factores, tal como los métodos de fabricación, los parámetros del proceso, las características de la tinta, el espesor de la capa, las interacciones de la superficie y las condiciones de secado [20]. Existe una convergencia dentro del proceso de fabricación de varias formas de celdas solares de película delgada basadas en solución, por la similitud de la estructura de los dispositivos. [21, 22] y también son similares los pasos de procesamiento intermedios tales como [20]:

1. Limpieza y preparación del sustrato superficial (para reducir la contaminación, mejorar la adherencia de la película y la calidad del recubrimiento).
2. Deposición de la solución (los parámetros del proceso de recubrimiento podrían optimizarse dependiendo de la viscosidad de la solución, el espesor de película necesario y el área de deposición).
3. Secado, calentamiento y enfriamiento lento de la solución (para mejorar la calidad de la película delgada en el sustrato).

El término lab-to-fab se refiere al cómo la producción de celdas solares de películas delgadas se migran de productos de laboratorio de pequeña escala hacia una de gran escala automática e industrial, debido a la oportunidad que ofrece la convergencia en

**Tabla 2.1:** Depositiones y métodos de caracterización compatibles en gran escala para sistema de fabricación continua, basado en [21, 24].

<b>Métodos de deposición</b>	<b>Métodos de caracterización</b>
Rocío pirolítico	Imágenes de fotoluminiscencia
Serigrafía	Termografía de bloqueo
Recubrimiento por ranura	Dispersión por rayos X
Tampografía	Dispersión por rayos X
Impresión por inyección de tinta	Elipsometría espectroscópica
Impresión en huecograbado	Prueba de Corriente-voltaje
Impresión flexográfica	Corriente inducida por láser
Serigrafía rotativa	

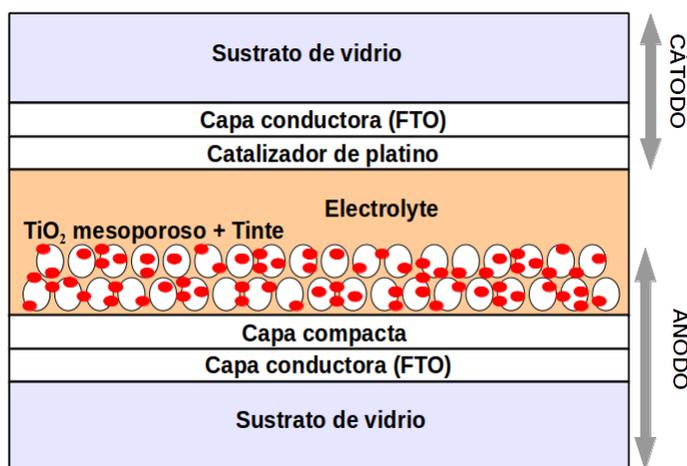
la estructura del dispositivo y los métodos de deposición que son escalables y de bajo costo [21, 23]. Ejemplos de métodos de deposición a pequeña escala y de bajo volumen incluye el recubrimiento por rotación (spin-coating) y dr blade, mientras que los métodos de deposición compatibles a gran escala y de gran volumen incluye deposición por rocío pirolítico, recubrimiento por ranura, serigrafía, tampografía e impresión por inyección de tinta, entre otros [24] (Ver Tabla 2.1).

Sin embargo, los principales desafíos en la migración lab-to-fab es aumentar la compatibilidad de los métodos de deposición y mantener las eficiencias de celdas solares, entre el procesamiento de pequeña y de gran escala [21, 23, 24]. Hösel y colaboradores [21], evidencian que la razón de esto, es debido al cambio del entorno de fabricación, la maquinaria y los materiales que se requieren a medida que la escala aumenta. Adicionalmente, Hösel enfatiza la importancia de seguir estudiando nuevos métodos para disminuir el riesgo involucrado en el proceso de escalamiento. Por la razón mencionada anteriormente, el campo de migración lab-to-fab de celdas solares de películas delgadas, debe analizar detenidamente las tendencias y tecnologías emergentes relacionadas con IIoT y la industria 4.0, para avanzar y complementar su investigación y desarrollo.

#### **2.1.4. Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante (CSSC)**

Actualmente, en el laboratorio de investigación de energías renovables del Instituto de Tecnología de Tijuana, se están investigando novedosas celdas solares de películas delgadas de tercera generación. En particular, CSSC, porque es una tecnología prometedora debido a su potencial para lograr una alta eficiencia, el proceso de fabricación es simple y está hecha de materiales ecológicos, abundantes y económicos.

Las CSSC constan principalmente de un foto-ánodo, un electrolito disuelto en una mezcla de solventes orgánicos y un foto-cátodo. El foto-ánodo tiene un vidrio con un sustrato recubierto de película conductora con dióxido de estaño dopado con fluor ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ ), una capa compacta y una película de  $\text{TiO}_2$  nano-cristalina que ha sido sensibilizada con un tinte. El electrolito es de tipo yoduro/triyoduro redox. El foto-cátodo tiene un vidrio con un sustrato recubierto de película conductora con  $\text{SnO}_2:\text{F}$  y una película delgada recubierta de platino. La sección transversal de las distintas capas de una CSSC se puede ver en la Figura 2.2.



**Figura 2.2:** Sección transversal de las distintas capas de una CSSC. Fuente: Autores.

## 2.2. Objetivo general

Examinar cómo la investigación y desarrollo del proceso de escalamiento de celdas solares de tercera generación puede beneficiarse de las tendencias y tecnologías emergentes relacionadas con el IIoT y la Industria 4.0.

## 2.3. Objetivos específicos

- Identificar los desafíos y oportunidades de escalamiento lab-to-fab de celdas solares de película delgada.
- Desarrollar un caso de estudio del proceso de fabricación de CSSC.
- Desarrollar una arquitectura de un sistema de procesamiento de información, de

diseño, de fabricación y prueba del sistema ciber-físico de producción de celdas solares de películas delgadas.

## Capítulo 3

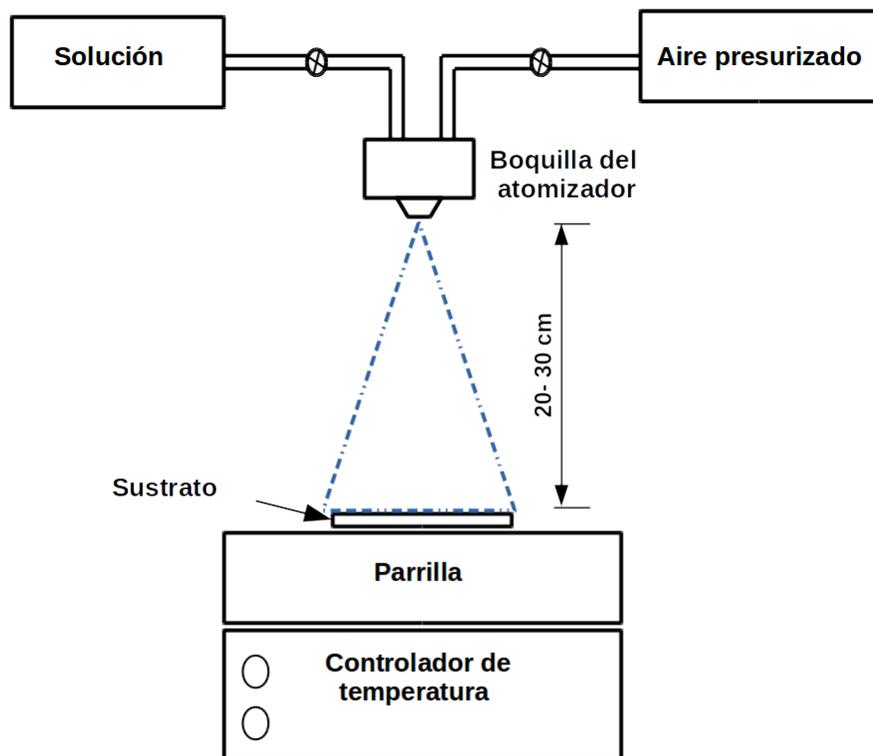
# Método de deposición por rocío pirolítico

Los métodos de deposición por rocío han sido empleados para producir películas delgadas, probablemente es la técnica más versátil de las diferentes técnicas de deposición y tiene la posibilidad de adaptarse con relativa facilidad a sistemas de automatización de alta velocidad [17]. Estas aplicaciones hacen de la deposición por rocío pirolítico un método idóneo para ser utilizado en la fabricación de diferentes dispositivos, como celdas solares, sensores, celdas de combustible, entre otros.

El equipo necesario para la deposición por rocío pirolítico es relativamente sencillo (Ver Figura 3.1). Los elementos principales son el recipiente de la solución precursora, el recipiente de presión de aire, el atomizador (neumático, ultrasónico o electrostático) y el calentador del sustrato con temperatura controlada. Adicionalmente, dicho método tiene el potencial de ser utilizado en la producción en masa y en grandes superficies debido a su reproducibilidad uniforme en presión atmosférica ambiental [25].

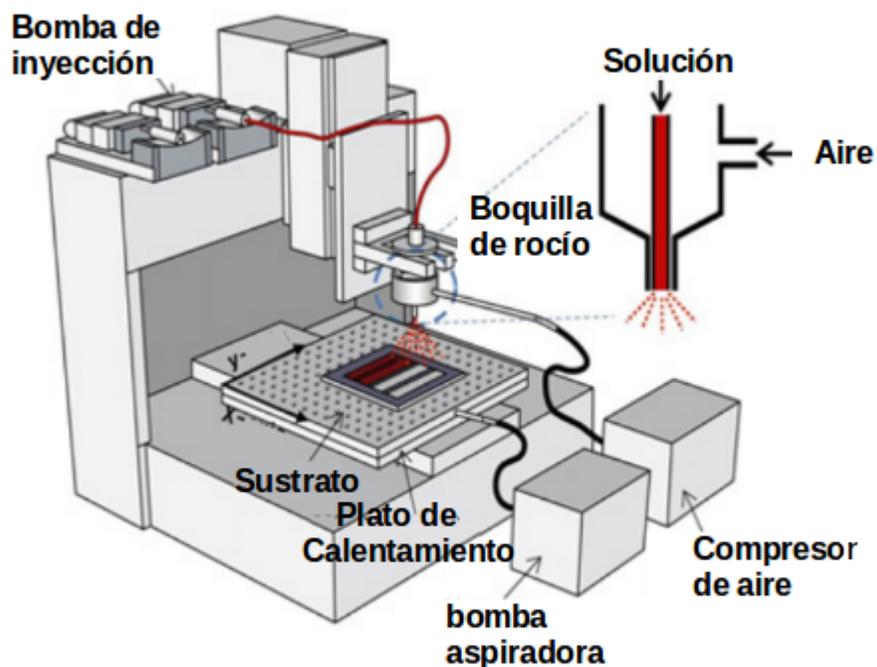
La morfología y las propiedades de la película delgada depositada están directamente influenciadas por diferentes parámetros del proceso, como la temperatura de la superficie del sustrato, la boquilla del atomizador, la solución precursora y sus aditivos. Las películas delgadas se ven influenciados por estos parámetros en aspectos como la rugosidad, el agrietamiento, la cristalinidad, la textura, entre otras propiedades físicas [25, 26].

Un aerógrafo de mano es un equipo sencillo para depositar una película delgada sobre un sustrato. Las características en qué difieren los distintos tipos de aerógrafos, son el accionamiento del gatillo (simple o doble acción), el mecanismo de alimentación de la



**Figura 3.1:** Elementos del equipo del método de deposición por rocío pirolítico. Fuente: Autores.

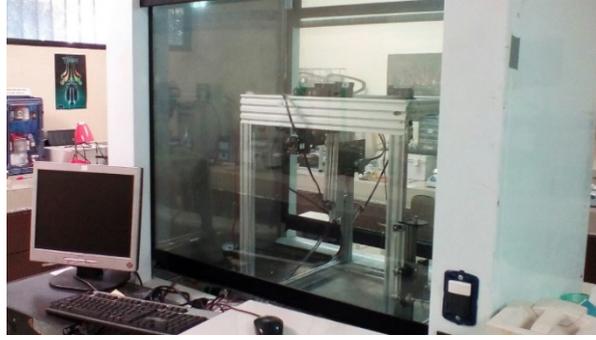
tinta y el punto de mezcla del gas con la tinta (interno o externo). Algunos trabajos informan sobre las películas delgadas realizadas con un enfoque totalmente en aerógrafo [27, 28], los dispositivos implementados se pueden observar en la Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Ejemplo de sistemas de deposición por rocío. Fuente [27].

Sin embargo, el uso de aerógrafos de accionamiento manual aún no han sido validados para la realización de dispositivos de gran superficie, debido a que el aerógrafo tiene una posición fija durante el proceso. La automatización del proceso es necesario (aunque esto añade nuevos parámetros para sintonizar), en particular para el movimiento de la boquilla de rocío [27].

Para la completa automatización de la fabricación de CSSC, existen diferentes combinaciones de métodos de deposición que deben utilizarse, tal como se describe en el trabajo de Mariani y colaboradores [24]. Adicionalmente, algunos trabajos muestran intentos de automatización parcial con la deposición por rocío pirolítico en CSSC, como el realizado por Okuya et al. [29] y particularmente en el Instituto Tecnológico de Tijuana, con los



**Figura 3.3:** Sistema automático de deposición por rocío en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Tijuana.

trabajos de Reynoso-Soto y colaboradores [30] y Alonso-Pérez y colaboradores [31] (Ver Figura 3.3).

# Capítulo 4

## Tecnología Big Data en la manufactura

La tecnología Big Data se refiere al conjunto de herramientas principalmente de software, en donde tienen como objetivo la gestión, el procesamiento y el análisis de grandes cantidades de datos. La tecnología Big Data es un área de gran interés dentro del campo de la investigación en manufactura, ya que podrían aplicarse a sistemas avanzados de análisis de datos extraídos de la gran cantidad de información generada por los dispositivos físicos y virtuales (Ver Figura 4.1). Como resultado de esto, se podrían crear escenarios reales o hipotéticos relacionados con el mantenimiento, optimización y reconfiguración en la planta de fabricación [3].

El análisis de Big data es de gran relevancia para una amplia gama de procesos científicos e industriales. Como ejemplo, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés), desarrolló una infraestructura para fabricar celdas solares y gestionar grandes cantidades de datos, mediante la construcción de un sistema integrado de deposición, caracterización y herramientas de procesamiento [32]. Adicionalmente, los métodos de control de calidad para los procesos de fabricación de semiconductores de película delgada también podrían beneficiarse de las tecnologías de Big Data [33].

Sin embargo, existe un creciente interés en la investigación científica en donde se reconocen los desafíos y la complejidad de su implementación. Tao y colaboradores [34], mencionan que aunque la tecnología Big Data se ha implementado en escenarios industriales, en algunos casos, los datos pueden ser inútiles porque cierta información está aislada y fragmentada en los dispositivos y procesos de fabricación. Cheng y colaboradores [35],

recomiendan probar y desarrollar la tecnología Big Data aplicada a la manufactura, primero en condiciones semi-industriales, para posteriormente tener éxito a largo plazo en la migración a grandes entornos industriales.

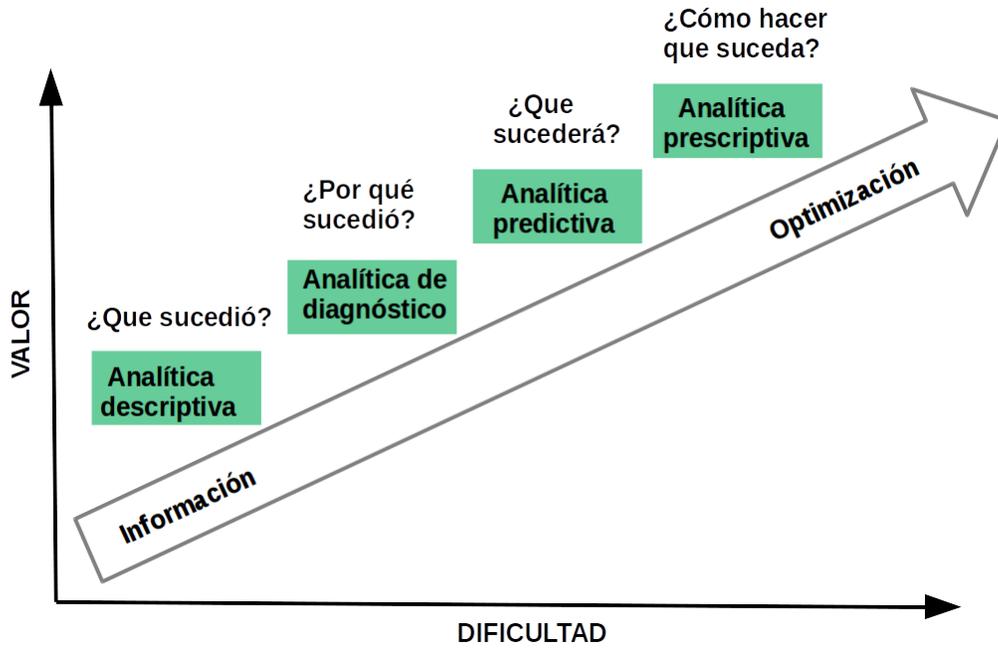


Figura 4.1: Cuatro niveles de análisis de datos. Fuente: autores a partir de [36].

# Capítulo 5

## Módulos de fábrica de aprendizaje

Los módulos de fábricas de aprendizaje representan un entorno estable para desarrollar y evaluar ideas y tecnologías relacionadas con sistemas de producción ciber-físicos, Big Data, IIoT e Industria 4.0. Proporcionan módulos altamente flexibles y reconfigurables de diferentes estructuras de los procesos de manufactura [4].

Con el fin de reducir el riesgo en su implementación, el diseño de módulos de fábrica de aprendizaje podría beneficiarse de la implementación de la metodología de comisión virtual (CV). Esta metodología permite desarrollar y optimizar un sistema de fabricación físico en un entorno híbrido (que incluye hardware y software), anticipándose a la comisión real y física. [37]. Los principales métodos para CV son [2, 37, 38] :

1. Software in the Loop (SIL): Se establece una conexión entre el modelo 3D del sistema y el software que emula los controladores.
2. Hardware in the Loop (HIL): la simulación del sistema de fabricación implica el uso de controladores de hardware reales conectados al software de simulación. Este método se acerca a una proporción 1: 1 en comparación con la comisión real y física.
3. Simulación híbrida: combina métodos de HIL y SIL.

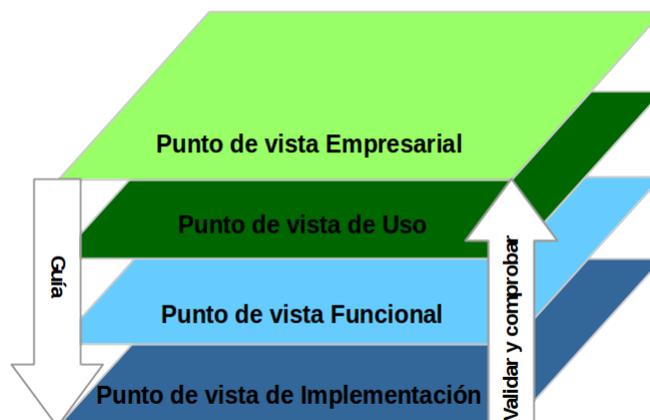


# Capítulo 6

## Modelos de arquitecturas de referencia

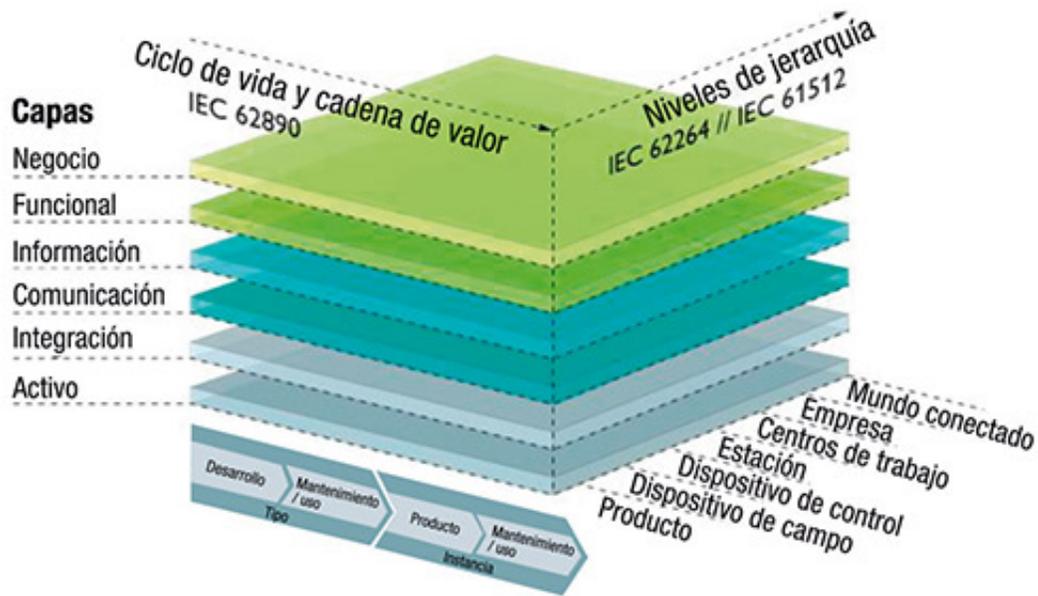
Los modelos de referencia para la industria 4.0 son un campo de investigación novedoso que requiere especial atención en los nuevos paradigmas ciber-físicos y de IIoT.

El IIRA fue publicado por primera vez en 2015 por el Consorcio de Internet Industrial, siguiendo el estándar de arquitectura de ingeniería de software y sistemas ISO 42010 [39, 40]. Esta arquitectura de referencia permite diseñar sistemas IIoT en diversos dominios (aplicaciones IIoT en áreas de energía, hospitalización, manufactura y transporte) usando un vocabulario común y un marco de arquitectura basado en estándares, con el fin de resolver inquietudes específicas desde el punto de vista de diferentes grupos de interés (ver Figura 6.1).



**Figura 6.1:** Distintas capas de IIRA basado en [6, 41].

El modelo de referencia para Industria 4.0 (RAMI 4.0) es un modelo de referencia arquitectónico unificado, que proporciona una comprensión colectiva de los estándares de la industria 4.0. Puede considerarse como una herramienta para mapear conceptos y casos de uso de industria 4.0 [6]. El modelo proporciona una orientación para trazar los requisitos de los casos de uso con el fin de definir y desarrollar más conceptos y productos de la industria 4.0 [6] (Ver Figura 6.2).



**Figura 6.2:** El modelo de arquitectura de referencia tridimensional RAMI 4.0 incorpora el mundo físico, el ciclo de vida y el mapeo de los modelos de negocios basados en tecnología de la información. Fuente:[42].

La interoperabilidad entre IIRA y RAMI 4.0 [5, 39] se refiere a la capacidad para trabajar de manera conjunta en diferentes sectores industriales, con el objetivo de avanzar en la estandarización efectiva de métodos y tecnologías relacionadas con IIoT y la industria 4.0 (Ver tabla 6.1). Como un ejemplo específico, Pedone y Mezgár [5] proponen una arquitectura preliminar que consiste en servicios virtualizados y conectados entre las capas de IIRA y de RAMI 4.0, para el caso de un entorno de fabricación de prototipos inteligentes conectados a servidores externos a través de internet.

**Tabla 6.1:** Comparación de las características generales de IIRA y RAMI 4.0. Fuentes: autores basados en [39].

	<b>IIRA</b>	<b>RAMI 4.0</b>
<b>País de origen</b>	Estados Unidos	Alemania
<b>Organización de origen</b>	Consortio del Internet industrial	Plataforma Industria 4.0
<b>Propósito</b>	Define, desarrolla y despliega sistemas IIoT.	Representa digitalmente un activo a lo largo de su ciclo de vida, y permite conexión entre activos a través de la Industria 4.0
<b>Características básicas</b>	Es una arquitectura abierta de alto nivel de abstracción basada en estándares	Es una a Arquitectura tridimensional e interrelacionada que está orientada a servicios
	Genérico para aplicar en la mayoría de los tipos de industrias. Promueve interoperabilidad.	Específico para representar un activo digitalmente
	Basado en ISO/IEC/IEEE 42010	Describe en detalle la Industria 4.0 componente, el Shell administrador y el sistema cibernético
	Basado en ISO/IEC/IEEE 42010	Basado en SGAM (Smart Grid Architecture Model).
	Se centra en el sistema del ciclo de vida del proceso	Se centra en el ciclo de vida del producto.
	Seguridad y protección son características de el Sistema IIoT.	Promueve la seguridad en el diseño
<b>Aplicaciones</b>	Manufactura, Energía, Sector salud, Transporte	Cadena de valor en Manufactura
<b>Estructura</b>	Consta de cuatro niveles llamados puntos de vista.  Los puntos de vista son: 1. Empresarial 2. Uso 3. Funcional 4. Implementación	Sistema Tridimensional, formado por tres ejes.  Los ejes son: 1. Arquitectura 2. Niveles de jerarquía 3. Ciclo de vida



# Capítulo 7

## Metodología para implementar manufactura de CSSC

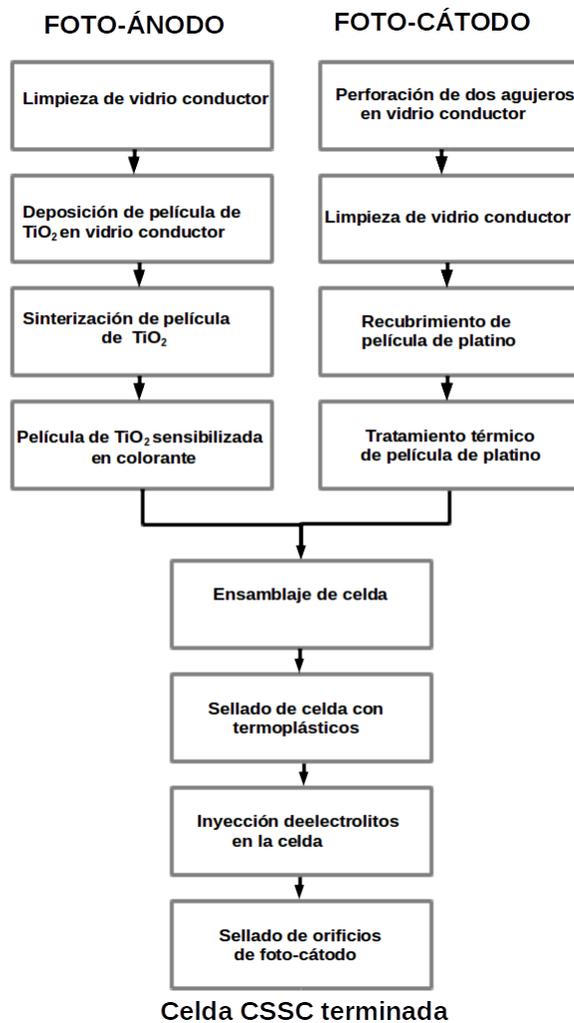
### 7.1. Procesamiento de CSSC

La secuencia de procesamiento para la fabricación artesanal de CSSC se presenta en la Figura 7.1. Este proceso se basa en los trabajos de Ito y colaboradores [43]. Los materiales químicos de la materia prima de las celdas solares fueron adquiridos de productos comerciales.

#### 7.1.1. Preparación del ánodo

Para la preparación del foto-ánodo, el vidrio revestido con  $\text{SnO}_2\text{:F}$  se limpia en una solución detergente, utilizando un baño ultrasónico (15 min). El  $\text{SnO}_2\text{:F}$  se expuso a un tratamiento con UV- $\text{O}_3$  (18 min). Además, debe sumergirse en una solución acuosa caliente de  $\text{TiCl}_4$  40 mM ( $70^\circ\text{C}$  durante 30 min). Para la deposición de la capa compacta, se utiliza una mezcla de 20 mL de etanol con 0.8 mL acetilacetona y 1.2 mL de isopropóxido de titanio a temperatura ambiente. La solución se deja en agitación magnética constante durante 10 minutos.

La solución se rocía 10 veces por el método automatizado de deposición por rocío, sobre el lado conductor y posteriormente se somete a un tratamiento en donde la temperatura debe estar a  $450^\circ\text{C}$  por 30 min. Los vidrios con  $\text{SnO}_2\text{:F}$  tratados con la capa compacta se utilizan como la base de los fotoánodos. Posteriormente, en los mismo vidrios se depositan 10 capas de  $\text{TiO}_2$  (Pasta de  $\text{TiO}_2$  marca Solaronix®), por el método de serigrafía. La película de  $\text{TiO}_2$  se sintetiza a una temperatura controlada creciente (hasta  $500^\circ\text{C}$



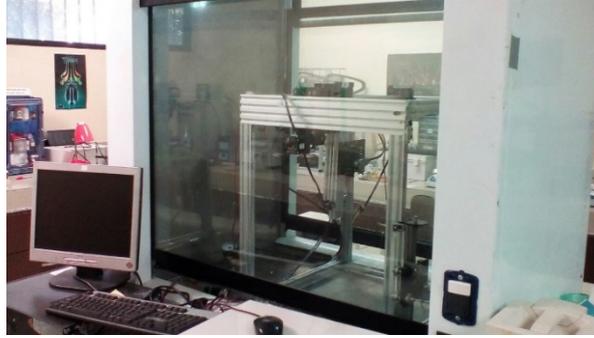
**Figura 7.1:** Secuencia de procesamiento para la fabricación de CSSC. Fuente:Autores.

durante 30 min). Después de un proceso de enfriamiento, el foto-ánodo se sensibiliza sumergiéndose en una solución con tinte durante aproximadamente 24 horas.

### Deposición por rocío pirolítico

Un diagrama esquemático del aparato de deposición por rocío se muestra en la Figura 3.1. En la Figura 7.2 se muestra el prototipo de sistema de deposición por rocío utilizado en el Instituto Tecnológico de Tijuana.

Las condiciones de la deposición por rocío fueron optimizadas para reducir la rugosidad de la superficie, tomando como base las investigaciones de los artículos [30, 31] y la previa investigación de tesis de maestría [44], producto de los mismos autores. Esto se llevó a cabo mediante la variación del flujo de inyección de la solución precursora (2 – 6 mL/min),



**Figura 7.2:** Sistema para la deposición por rocío (prototipo) Fuente: Elaboración Propia [30, 31].

el flujo de gas acarreador ( $25 - 30 \text{ lbf/pulg}^2$ ), la distancia entre la boquilla-sustrato (30 - 20 cm) y la velocidad de deposición (205 pulg/min). La etapa de traslación de los ejes X, Y y Z es controlada por una computadora que tiene el sistema operativo LinuxCNC [45].

### Deposición automática por rocío pirolítico

La secuencia para la operación del sistema automatizado de deposición por rocío para la obtención de las películas de  $\text{TiO}_2$  es la siguiente:

1. Utilizando un editor de texto se define en código G los siguientes parámetros, los cuales son introducidos en la computadora que contiene LinuxCNC:
  - a) La trayectoria de recorrido de los ejes (x, y)
  - b) La distancia entre la boquilla del eje z y el sustrato.
  - c) El número de repeticiones de la trayectoria con lo que se define el número de capas depositadas.
  - d) El tiempo de pausas entre cada capa.
  - e) La velocidad de recorrido de los ejes.
  - f) La velocidad del flujo de la solución de la bomba de infusión de jeringa.
2. Colocar la solución de  $\text{TiO}_2$  y celulosa en el contenedor de la bomba de infusión de jeringa y conectarlo a la manguera de la boquilla de rocío.
3. Encender el compresor de aire y conectarlo a la manguera de la boquilla de rocío.
4. Seleccionar el archivo del código G en la interfaz de LinuxCNC.
5. Ejecutar el archivo del código G en LinuxCNC.

6. Al terminar el sistema de deposición automática apagar el compresor de aire.
7. Retirar la muestra que está sobre el sustrato de vidrio.

### 7.1.2. Preparación del cátodo

Para la preparación del fotocátodo, primero se debe perforar el vidrio conductor para que tenga dos orificios (de 1 mm de diámetro cada uno) para la inyección de electrolito y la extracción de aire. Posteriormente, el vidrio conductor debe tener el mismo procedimiento de limpieza que el utilizado en el foto-ánodo. Finalmente, sobre el sustrato de  $\text{SnO}_2\text{:F}$  del vidrio conductor perforado, se deposita la solución viscosa de platino constituida por Platisol T/SP Solaronix, con la técnica de la dr. blade, y se expone a un tratamiento térmico incremental controlado (hasta 450 °C durante 15 min).

### 7.1.3. Ensamblaje de CSSC

La celda solar se construye ensamblando el foto-ánodo, el sellador termoplástico y el foto-cátodo, en una celda tipo sándwich aplicando calor y presión. El electrolito se prepara con  $I^-/I_3^-$ :  $I_2$  0.05 M,  $Li$  0.1 M,  $TBP$  0.5 M (tertbutil piridina),  $TBAI$  0.6 M (yoduro de tetrabutilamonio) en 3-metoxipropionitrilo / acetonitrilo (50:50). El electrolito se introduce en el espacio sellado dentro de la celda solar a través del fotocátodo perforado utilizando la técnica de relleno al vacío (vacuum backfilling), con el objetivo de eliminar el aire e impulsar el electrolito al espacio sellado de la celda. Los orificios del fotocátodo son sellados con termoplásticos y una cubierta de vidrio para minimizar la evaporación del electrolito. Por último, se procede a evaluar la eficiencia de conversión energética utilizando un simulador solar (Solar Oriel, LCS-100) con un calibrador Newport, bajo irradiación  $100mW/cm^2$  y 1 sol de distancia.

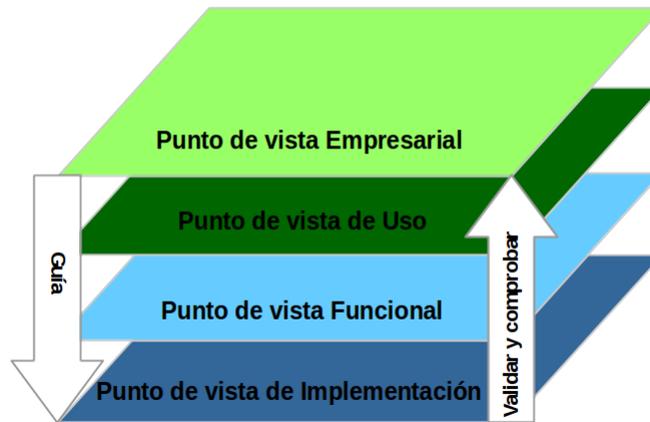
## 7.2. Metodología de IIRA

IIRA y RAMI 4.0 son dos de las arquitecturas de referencia líderes para la estandarización global de los recursos y procesos de producción [5, 39]. En esta tesis, fue IIRA seleccionada como arquitectura de referencia, principalmente por dos motivos:

1. Existe interoperabilidad y elementos comunes entre ambas arquitecturas de referencia [5, 6].

2. IIRA describe cómo desarrollar un sistema IIoT mientras que RAMI 4.0 no lo hace [40].

Este caso de estudio sigue la metodología de IIRA para definir los requerimientos [41] y describir la línea de producción de I&D para la fabricación de CSSC. El modelo del caso de estudio se basa en IIRA versión 1.9 y el análisis sintetizado realizado por Fraile y colaboradores [6]. En la metodología IIRA, se definen los puntos de vista en distintas capas (ver Figura 7.3)



**Figura 7.3:** Distintas capas de IIRA en donde se describen los correspondientes puntos de vista[41].

### 7.2.1. Punto de vista empresarial

Este punto de vista identifica a los diferentes actores interesados en la plataforma de la manufactura digital (fabricantes y otros actores interesados destacados, como proveedores de equipos de fabricación, desarrolladores de software o proveedores de servicios). Específicamente, sus elementos son:

- **Grupos de interés(Stakeholders):** actores de cada organización con un interés importante en el sistema y una fuerte influencia en su dirección. Las partes interesadas son los principales impulsores de la concepción y el desarrollo del sistema.
- **Visión:** estado futuro de la organización.
- **Valores:** justificación, descripción narrativa de por qué la visión tiene importancia para las partes interesadas, así como para los usuarios del sistema desarrollado.

- **Objetivos clave:** resultados técnicos cuantificables de alto nivel de abstracción del sistema en el contexto de la entrega de valores.
- **Capacidades fundamentales:** especificación de alto nivel de abstracción de la capacidad del sistema para completar tareas específicas, caracterizadas por atributos cuantificables para medir el éxito del sistema.

### 7.2.2. Punto de vista de uso

El punto de vista de uso, describe cómo el sistema realiza las capacidades fundamentales identificadas en el punto de vista empresarial, a través de su descomposición en tareas (unidades de trabajo) y actividades (cómo se utiliza el sistema) entre diferentes componentes del sistema. Este punto de vista aborda las expectativas del uso esperado del sistema, típicamente representado como secuencias de actividades que involucran a usuarios humanos o lógicos, sus principales elementos son:

1. **Tarea:** Unidad básica de trabajo, como la invocación de una operación, una transferencia de datos o una acción realizada por un partido que asume un rol.
2. **Mapa funcional:** mapa de las funciones o componentes funcionales de la tarea.
3. **Mapa de implementación:** mapa del componente de implementación en el que se basa la tarea para su ejecución.
4. **Rol:** conjunto de capacidades que asume una entidad para iniciar, participar en la ejecución o consumir el resultado de una tarea.
5. **Partido:** agente (humano o automatizado) que tiene interés y responsabilidad en la ejecución de una tarea. Un agente ejecuta una tarea asumiendo un rol con las capacidades adecuadas para la ejecución de la tarea.
6. **Actividad:** coordinación específica de tareas necesarias para utilizar u operar el sistema, consta de los siguientes elementos:
  - a) **Desencadenador (Trigger):** condiciones que inician una actividad, opcionalmente asociadas a un rol responsable de iniciar o habilitar la ejecución.
  - b) **Flujo de trabajo (Workflow):** Organización de tareas (secuenciales, iterativas, paralelas, condicionales).
  - c) **Efecto:** diferencia en el estado del sistema después de la finalización exitosa de una actividad.

- d) Restricciones: características que deben conservarse durante la ejecución de la actividad.

En base a lo anterior, el punto de vista de uso captura la descripción de los detalles técnicos y el análisis detallado de los diferentes casos de uso. En la definición del flujo de trabajo de las actividades se identifican los diferentes componentes del sistema y el intercambio de información entre ellos.

### 7.2.3. Punto de vista funcional

El punto de vista funcional segmenta en partes funcionales a un sistema IIoT, para describir la estructura del sistema y las interrelaciones, interfaces e interacciones entre sus componentes funcionales, así como con sistemas externos. De esta manera, el punto de vista funcional establece cinco dominios funcionales (control industrial, operaciones, información, aplicación y negocio), cinco características del sistema (seguridad, protección, resiliencia, confiabilidad, privacidad y escalabilidad) y cuatro funciones transversales (conectividad, datos distribuidos, gestión, análisis industrial y control inteligente), los cuales se describen como:

1. **Dominios funcionales.** Descomposición de las distintas funcionalidades de un sistema de control industrial distribuido en dominios físicos:
  - a) Dominio de control: funciones que realizan los sistemas de control industrial, tal como la lectura de datos de sensores y el control mediante actuadores.
  - b) Dominio de operaciones: funciones para la gestión, seguimiento y optimización de las funcionalidades del dominio de control (gestión, pronósticos, optimización y diagnóstico).
  - c) Dominio de la información: modelado de sistemas, recopilación de datos, persistencia, transformación y análisis.
  - d) Dominio de aplicaciones: aplicación de lógica y reglas para realizar funcionalidades específicas, interfaces de usuario (UI por sus siglas en inglés) e interfaces de programación de aplicaciones (API por sus siglas en inglés) para exponer funcionalidades para humanos y aplicaciones externas.
  - e) Dominio empresarial: funciones para habilitar las operaciones de un extremo a otro del sistema IIoT, incluidas las que dan soporte a los procesos del sistema, que también se integran con funciones específicas tradicionales. Los ejemplos

incluyen recursos empresariales (ERP), Gestión del ciclo de vida del producto (PLM), Sistemas de ejecución de fabricación (MES) Gestión de recursos humanos (HMR), entre otros.

2. **Funciones Transversales.** Funcionalidades que habilitan al Internet Industrial para interrelacionar y habilitar los dominios funcionales:

- a) Conectividad: funcionalidades que permiten el intercambio de información y la manufactura colaborativa.
- b) Gestión de datos distribuidos: coordinación de las tareas de gestión de datos entre los componentes del sistema.
- c) Analítica industrial: aplicación de funciones analíticas sobre los datos adquiridos de los dispositivos industriales.
- d) Control inteligente: implementación de técnicas que involucran el control automático y la inteligencia computacional (Redes neuronales, lógica difusa, aprendizaje de máquinas, aprendizaje reforzado, algoritmos genéticos, cómputo evolutivo, entre otras).

3. **Características del sistema.** Propiedades del sistema que surgen de las interacciones entre las partes del sistema:

- a) Confiabilidad: coordinación e integración de diferentes funciones implementadas en los diferentes componentes del sistema para garantizar la protección, seguridad, privacidad, resiliencia y confiabilidad del sistema en general.
- b) Escalabilidad: funciones para habilitar o facilitar la implementación eficiente de instancias a gran escala del sistema.

El punto de vista funcional también se ocupa de la distribución de dominios funcionales a través de recursos computacionales distribuidos en diferentes patrones de implementación. También forman parte del punto de vista funcional las consideraciones sobre el uso de tecnologías con el objetivo de distribuir los diferentes dominios funcionales. Por ejemplo la computación en la nube, infraestructura como servicio (IaaS por sus siglas en inglés), plataforma como servicio (PaaS por sus siglas en inglés) o software como servicio (SaaS por sus siglas en inglés).

#### 7.2.4. Punto de vista de implementación

El punto de vista de la implementación se ocupa de las tecnologías necesarias para implementar componentes funcionales, esquemas de comunicación y procedimientos involucrados durante el ciclo de vida del procesamiento del producto. El punto de vista de implementación define tres patrones para una implementación del sistema IIoT:

1. Patrón de arquitectura de tres niveles.
2. Patrón de arquitectura de gestión y conectividad de borde mediado por gateway.
3. Patrón de bus de datos en capas.

El patrón de arquitectura de tres niveles divide el sistema en tres niveles (borde, plataforma y empresa) y tres redes (proximidad, acceso y servicio). El nivel de borde (Edge tier) recopila datos de sensores, actuadores, dispositivos, sistemas de control o cualquier activo en las proximidades del sistema físico, que se denominan colectivamente nodos de borde. Para ello, el nivel de borde utiliza la red de proximidad. La red de acceso (access network ) permite la conectividad entre el nivel de borde y el nivel de plataforma.

El nivel de plataforma (platform tier) consolida los procesos operativos, realiza análisis de datos y funciones de transformación con respecto a los flujos de datos. También ofrece funciones de gestión en los nodos de borde y envía mensajes de control desde el nivel empresarial al nivel de borde. La red de servicios permite la conectividad entre los servicios en el nivel de plataforma, así como entre los niveles de plataforma y empresa.

El nivel empresarial implementa aplicaciones específicas de dominio, sistemas de soporte de decisiones y proporciona interfaces de usuario a los usuarios finales. Implementa las reglas y la lógica de control del sistema y emite comandos de control a la plataforma y los niveles de borde.



# Capítulo 8

## Resultados

### 8.1. Implementación de IIRA

#### 8.1.1. Revisión de los requisitos para la arquitectura del sistema

El Instituto Tecnológico de Tijuana está en proceso de desarrollar una infraestructura para la fabricación de celdas solares de películas delgadas, lo cual proporcionará equipos modulares, reconfigurables y robustos que se aplicarán para la deposición, procesamiento y caracterización, con la ayuda de módulos de fábricas de aprendizaje, comisión virtual y análisis de Big Data.

La información sobre las diferentes etapas del proceso de fabricación (deposición, procesamiento y caracterización) se integrará en un software en un trabajo futuro. Con el propósito de generar nuevo conocimiento, con el análisis en tiempo real y análisis fuera de línea, de la gran cantidad de datos que generará cada proceso de fabricación. Este caso de estudio sigue la metodología IIRA para definir los puntos de vista [41] y describir la línea de producción de I&D para la fabricación de CSSC. El modelo del caso de estudio se basa en IIRA versión 1.9 y la síntesis de IIRA del trabajo de fraile [6].

#### 8.1.2. Punto de vista empresarial

En este punto de vista, el primer paso es especificar las principales capacidades que se espera que proporcione la arquitectura del sistema. Este punto de vista aborda algunas cuestiones fundamentales como definir ¿qué es lo que se quiere construir?, ¿por qué se quiere construir? y ¿qué valor aporta?. Con una comprensión de estas y otras preguntas

relacionadas, los actores principales pueden guiar el proceso de conceptualización, construcción y operación del sistema. Los componentes principales de la implementación de este punto de vista se muestran a continuación:

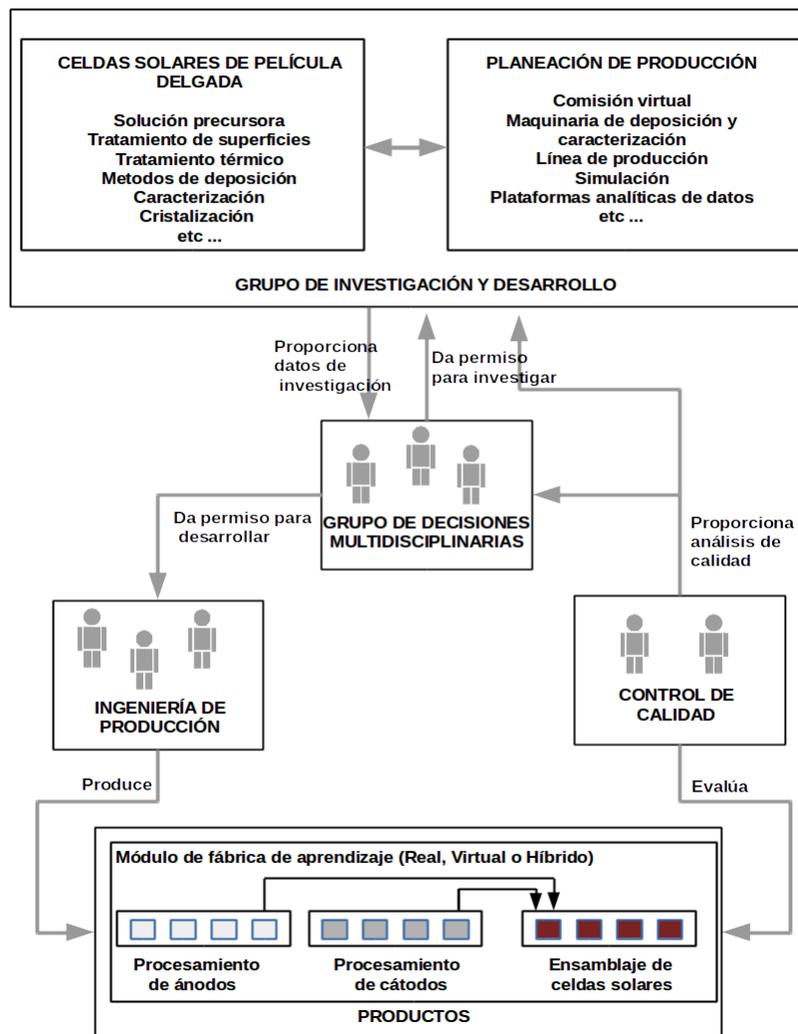
- Actores principales: lo constituyen el grupo de I&D, el grupo de decisión multidisciplinar, el grupo de ingeniería de producción y el grupo de control de calidad.
- Visión: desarrollar una arquitectura de sistema para un módulo de fábrica de aprendizaje, que es una combinación de elementos reales, virtuales o híbridos, que permite la producción flexible y el monitoreo del acondicionamiento de la línea de producción y los productos fabricados para celdas solares de película delgada.
- Valores: contribuir a la colaboración multidisciplinar entre la investigación y el desarrollo del proceso de escalamiento de celdas solares de tercera generación y la implementación de métodos y tecnologías relacionados con IIoT y la industria 4.0.
- Capacidades fundamentales:
  1. La arquitectura del sistema de módulo de fábrica de aprendizaje, dispondrá de herramientas visuales para el diseño de los dispositivos, la planificación de la producción, el flujo del proceso, la maquinaria y el estado del producto.
  2. La arquitectura del sistema de módulo de fábrica de aprendizaje, dispondrá de capacidades que estén basados en análisis en tiempo real y análisis fuera de línea.
  3. Los conocimientos del análisis de datos podrían ayudar a tomar mejores decisiones en el diseño, mantenimiento y reparación del módulo de fábrica de aprendizaje.
  4. La retroalimentación proporcionada por el uso de los activos de la línea de producción permitirá un rápido aislamiento de fallas y una detección temprana de fallas.
  5. Facilitar el diseño e implementación de herramientas de deposición y caracterización para la producción de celdas solares de película delgada.

### **8.1.3. Punto de vista de uso**

El siguiente paso es utilizar el punto de vista del uso, para describir cómo se utilizará el sistema para ofrecer las capacidades fundamentales del sistema descritas en el punto de vista empresarial. Incluye un escenario de alto nivel que describe la comunicación

entre los roles de los actores con los departamentos centrales. El escenario de I&D para una línea de producción de CSSC (ver Figura 8.1), ilustra un ciclo de vida del producto que comienza con la generación de conocimiento en laboratorios multidisciplinarios del Instituto Tecnológico de Tijuana y concluye con un producto en forma de módulo de fábrica de aprendizaje real, virtual o híbrido.

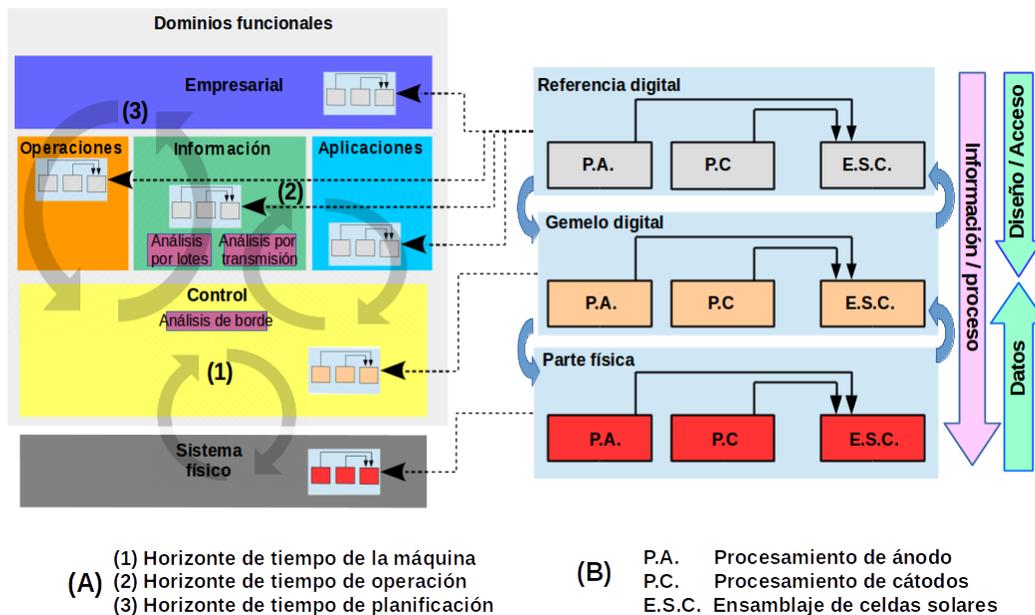
El análisis en este punto de vista mejora aún más la comprensión del sistema que se va a construir y proporciona retroalimentación al punto de vista empresarial al validar o revisar sus funcionalidades.



**Figura 8.1:** Escenario de desarrollo de investigación y desarrollo del ciclo de vida del producto.  
Fuente: Autores.

### 8.1.4. Punto de vista funcional

Se realiza un análisis en donde se analizan las funcionalidades del sistema, se identifican sus principales bloques funcionales, las relaciones e interacciones entre ellos y las interfaces a través de las cuales interactúan. El punto de vista funcional proporciona cinco dominios funcionales específicos (control, información, operaciones, aplicaciones y negocios) que están destinados a respaldar el uso, las relaciones y las interacciones de la funcionalidad del sistema (ver Figura 8.2 ).



**Figura 8.2:** (A) Mapeo analítico del punto de vista funcional IIRA basado en [46] y B) representación digital de los mismos dispositivos (físicos) en diferentes aplicaciones de software para la manufactura de celdas solares [5, 47]. Fuente: Autores.

Dominio de control: consiste en un conjunto de funciones realizadas por un sistema de control y automatización para un módulo de fábrica de aprendizaje real, virtual o híbrido, que requiere comunicación y procesamiento en tiempo real. Estas funciones controlan los dispositivos virtuales y físicos a través del uso de los datos en sensores y actuadores conectados al proceso de fabricación de CSSC (ver Figura 7.1 y Tabla 2.1).

Dominio de operación: consiste en un conjunto de funciones que tienen como finalidad el aprovisionamiento, gestión y optimización de la línea de producción virtual en el dominio de control.

**Tabla 8.1:** Perspectivas proporcionadas por el análisis de datos según diferentes escalas de tiempo [46].

<b>ID</b>	<b>Paso de procesamiento</b>	<b>Rango</b>	<b>Información proporcionada</b>
1	Horizontes de escala de tiempo en la maquina	Milisegundo o menos	Información sobre el bucle de control en tiempo real
2	Horizontes de escala de tiempo en la operación	Segundos o más	Información sobre la máquina que permite el mantenimiento avanzado e impulsa operaciones óptimas en toda la línea de producción
3	Horizontes de escala de tiempo en la planificación	Días o más	Conocimientos que permiten tomar mejores decisiones en la investigación y el desarrollo del proceso de ingeniería

Dominio de la información: consiste en un conjunto de funciones que tienen el propósito de recolectar, transformar y analizar los datos generados en todo el sistema con el fin de adquirir conocimientos para optimizar las operaciones en el módulo de fábrica de aprendizaje. Esto se hace construyendo, validando e implementando modelos analíticos y de procesamiento en él.

Dominio de aplicación: consiste en un conjunto de funciones que aplican reglas y lógica del sistema, con el fin de optimizar el funcionamiento de la línea de producción. Con el uso de los resultados analíticos del dominio de la información y los objetivos del punto de vista empresarial. Estas funciones permiten interacciones humanas y de aplicaciones con el uso de interfaces de usuario (UI) e interfaces de programación de aplicaciones (API).

Dominio empresarial: consta de un grupo de funciones que integran la información en los sistemas y aplicaciones empresariales para permitir las operaciones de un extremo a otro del sistema de línea de producción de I&D. Los ejemplos incluyen Planificación de recursos empresariales (ERP), Gestión del ciclo de vida del producto (PLM), Sistemas de ejecución de fabricación (MES) Gestión de recursos humanos (HMR), entre otros.

En la I&D de la línea de producción de para la fabricación de CSSC, existen diferentes horizontes de escala de tiempo para el análisis de datos, que podrían ajustarse para la interrelación de los diferentes dominios (Ver Figura 8.2 y Tabla 8.1 ). Adicionalmente, en la misma Figura 8.2, se muestra la relación entre el mapeo analítico del punto de vista funcional y la representación digital de los mismos dispositivos (físicos) de la fabricación de celdas solares, en diferentes aplicaciones de software.

### 8.1.5. Punto de vista de implementación

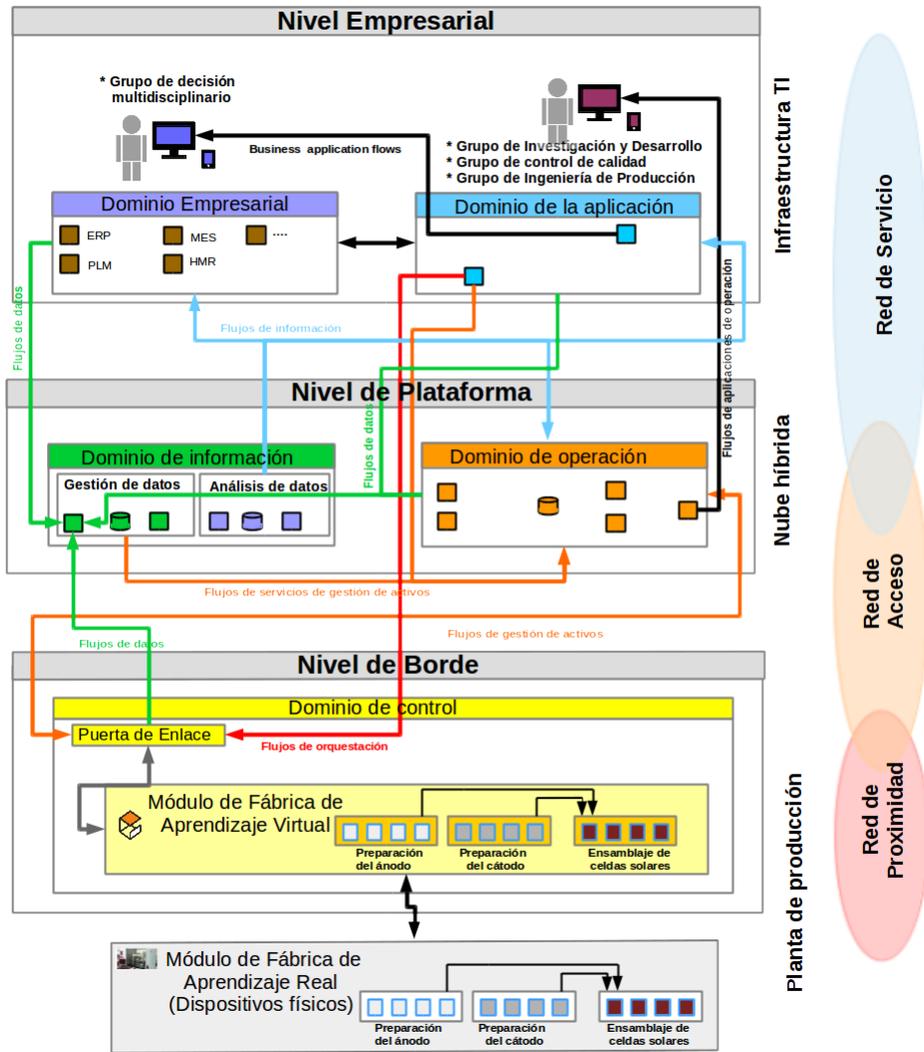
Finalmente, el punto de vista de implementación examina la organización, distribución e interacciones de los bloques funcionales identificados en los puntos de vista anteriores. El enfoque de este análisis (ver Figura 8.3) es el siguiente:

- Cómo estos bloques funcionales se organizan y distribuyen como componentes del sistema en una topología de red basada en los requisitos de implementación.
- Cómo interactúan entre sí los componentes, para apoyar las actividades identificadas en el punto de vista de uso.
- Qué tecnologías usar para implementar los componentes.

En el punto de vista de la implementación, se propone una topología de red según los requisitos de implementación. La arquitectura divide los sistemas en tres niveles (nivel de borde, nivel de plataforma y nivel de empresa) y tres redes (proximidad, acceso y servicios) [5, 41] (ver Figura 8.3).

El *nivel de borde* se encuentra en el piso de producción del módulo de la fábrica de aprendizaje. Este nivel contiene el dominio de control. El nivel de borde es donde ocurre la integración e interoperabilidad entre el módulo de la fábrica de aprendizaje virtual y real, para el sensor y los actuadores conectados al proceso de fabricación de CSSC (ver Figura 7.1 y Tabla 2.1). El nivel de borde utiliza la red de proximidad para recopilar datos de los nodos de borde.

Las tecnologías consideradas para ser aplicadas en Edge tier, se basan en simuladores de robots, ya que cuentan con los recursos para ser implementados en aplicaciones industriales, como planificación de trayectorias, cinemática inversa, interacciones dinámicas precisas, control de robots e implementación de sensores [48]. Producto de esta tesis se desarrolló un artículo del congreso sobre este tema [49]. Por lo tanto, ROS y Gazebo, son



**Figura 8.3:** Arquitectura del sistema aplicada módulo de fábrica de aprendizaje basada en [5, 41]. Fuente: Autores.

las tecnologías consideradas en este estudio por su versatilidad, ser de código abierto y gratuitas.

ROS [50, 51], es un marco de trabajo de código abierto y gratuito basado en Linux, que proporciona herramientas, bibliotecas y convenciones para simplificar la tarea de crear aplicaciones robóticas. ROS tiene un diseño altamente modular, que opera como un grupo de “nodos” individuales que se comunican entre sí a través de la metodología de publicación / suscripción [52–54].

Gazebo [55, 56], es un simulador de múltiples robots 3D gratuito y de código abierto

capaz de representar robots, objetos y sensores. Gazebo también admite un enfoque distribuido para ejecutar simulaciones, ya sea en servidores remotos o en la nube [48, 55]. Adicionalmente, Gazebo puede utilizar cámaras monoculares virtuales, sensores de contacto, sensores de identificación por radiofrecuencia (RFID), entre otros componentes virtuales [48, 56].

ROS tiene una interfaz adecuada con Gazebo, en donde ROS se utiliza para realizar el control y la comunicación, y Gazebo se utiliza para la simulación visual en un entorno basado en la física [48, 52]. Existe una comunicación bidireccional entre Gazebo y ROS. Un controlador creado con ROS se puede utilizar tanto para el robot simulado en Gazebo como para el robot real, lo que hace que toda la simulación de hardware / software sea mucho más fácil de implementar [48, 52]. Específicamente con metodologías como HIL y SIL en sistemas ciber-físicos [53, 54]. Recientemente, estas tecnologías se han utilizado con las metodologías de comision virtual [57]. Adicionalmente, Wang [58] implementó ROS en un entorno para conectar los recursos informáticos y de servicios del mundo cibernético, a las máquinas y robots en el entorno de la planta físico de manufactura.

El *nivel de la plataforma* se encuentra en la nube (servidores públicos y privados). Este nivel contiene el dominio de operación y el dominio de información. Utiliza la red de acceso para permitir el flujo de datos y control entre el nivel de borde y el nivel de plataforma. Las tecnologías consideradas para ser aplicadas en el nivel de Plataforma se basan en software analítico de Big Data, que se utiliza en la actualidad en el sector de la tecnología de información y que son de código libre y gratuitos [59]. Las tecnologías en consideración son Apache Storm, Casandra y Apache Spark, que podrían conectarse al software en el nivel de borde. Los agentes de publicación-suscripción (como ejemplo, Kafka [60] son responsables de conectar y convertir datos entre dispositivos locales y un agente de mensajes, utilizando un controlador que se implementa en las puertas de enlace. Un artículo del congreso sobre este tema se desarrolló como un producto de esta tesis[59]. Para que la capa de procesamiento tenga una arquitectura lambda, estas capas utilizaron Apache Storm para el procesamiento en línea y Apache Spark para el procesamiento fuera de línea de la base de datos implementada en Cassandra. La plataforma de código abierto apache storm tiene la función de manejar el procesamiento de datos en tiempo real, como el análisis y la clasificación. Tiene una topología que consta de nodos utilizados para la transmisión de datos llamados puntos y nodos utilizados para el procesamiento de datos por lotes. El manejo masivo de datos por asalto puede procesarse y enviar la respuesta inmediatamente o puede realizar algún preprocesamiento

para un análisis posterior [61, 62]. Los datos generados desde el módulo de procesamiento de flujo se pueden almacenar en la Apache Cassandra la cual es una base de datos de código abierto, escalable y tolerante a fallas. Donde las características principales incluyen que está distribuido, descentralizado y dado que todos los nodos del clúster son idénticos, no hay un solo punto de falla. Adicionalmente, se ha demostrado que es tolerante a fallas en el servidor local o en la infraestructura de la nube [63]. Para el procesamiento por lotes fuera de línea, se puede implementar Apache Spark junto con Apache Cassandra. Apache Spark es un motor informático de código abierto que contiene un conjunto de bibliotecas para el procesamiento de datos en paralelo en grupos de ordenadores [64]. La comunicación de integración entre Spark y Cassandra con el procesamiento por lotes fuera de línea, podría permitir el aprendizaje automático para el análisis y la predicción estadísticos.

El *nivel empresarial* se localiza en la infraestructura de servidores locales de la universidad. Este nivel contiene el dominio de la aplicación y el dominio empresarial. El nivel empresarial contiene las UIs y las API para las partes interesadas. Utiliza la red de servicios para permitir la conectividad de los servicios entre el nivel de plataforma y el nivel empresarial.



# Capítulo 9

## Discusión

En esta tesis IIRA se implementó para la I&D de la fabricación de CSSC, con el fin de aumentar el conocimiento del proceso de escalamiento de celdas solares de películas delgadas, para llevar a cabo una migración progresiva de celdas solares de nivel laboratorio a nivel semi-industrial. Se estudió un escenario particular de una línea de producción de CSSC, con el fin de sentar las bases para el desarrollo de una infraestructura consistente en un módulo de fábrica de aprendizaje real, virtual o híbrido (ver Figura 8.3). La implementación de IIRA contribuyó a la colaboración multidisciplinaria y estableció los fundamentos para la eventual construcción de la infraestructura para un módulo de fábrica de aprendizaje en el Instituto Tecnológico de Tijuana, con el objetivo de futuras investigaciones y capacitaciones en nuevas tendencias y tecnologías aplicadas a la fabricación de celdas solares de película delgada.

Un módulo de fábrica de aprendizaje para el diseño, fabricación y caracterización de equipos y productos, será útil para la integración e interoperabilidad de la deposición, procesamiento y caracterización de celdas solares de películas delgadas (ver Tabla 2.1). El módulo de fábrica de aprendizaje se desarrollará tomando en cuenta los beneficios prácticos de la implementación. En la línea de producción para la fabricación de CSSC, el análisis de datos tiene diferentes tiempos de procesamiento que podrían ajustarse para la interrelación de los diferentes dominios. Ver la Figura 8.2 y la Tabla 8.1. Adicionalmente, en la misma figura, se muestran la relación entre el mapeo analítico del punto de vista funcional y la representación digital de los mismos dispositivos (físicos) de la fabricación de celdas solares, haciendo hincapié en las diferentes aplicaciones de software necesarias para análisis de Big Data y la comisión virtual. La implementación de IIRA, se ampliará para incluir las principales actividades de los laboratorios del Instituto Tecnológico de Tijuana, siguiendo la opinión y experiencia de los diferentes investigado-

res, ingenieros y técnicos en un proceso de colaboración multidisciplinario (ver Figura 8.1).

IIRA es uno de los principales marcos de estandarización global para arquitecturas industriales de Internet [5]. IIRA permite diseñar una arquitectura de sistema IIoT utilizando un vocabulario común, un marco de arquitectura de base estándar y una arquitectura abierta de referencia [6]. La implementación del IIRA es particularmente útil como punto de partida para la conceptualización y diseño del sistema en un entorno de colaboración multidisciplinar, ya que sustenta un método iterativo y colaborativo para analizar el sistema a través de diferentes puntos de vista. Para lograr esto, IIRA se enfoca en la integración de las capacidades centrales y demostración de casos de uso fundamentales (ver Figura 7.1) desde la perspectiva de las partes interesadas y sus necesidades.

Este estudio presenta dos limitaciones principales. En primer lugar, existe la necesidad de continuar con el análisis iterativo, en donde se profundice cada vez más en los requerimientos del sistema siguiendo la metodología IIRA a fin de implementar completamente la infraestructura del módulo de fábrica de aprendizaje. En segundo lugar, el proceso de fabricación automática de CSSC aplicado al módulo de fábrica de aprendizaje, ha sido simplificado en su descripción. Sin embargo abre la posibilidad de ser utilizado también como referencia en la investigación de fabricación de diferentes tipos de celdas solares de películas delgadas. A pesar de estas limitaciones, en base en la investigación en la literatura hasta el momento de la escritura de esta tesis, IIRA no se ha implementado al proceso de escalamiento de celdas solares de tercera generación, en particular CSSC, y en este estudio se presenta una solución a problemas comunes de laboratorios que trabajan migración hacia una escala semi-industrial de celdas solares [21, 24], lo cual abre nuevas oportunidades de investigación para entornos de colaboración multidisciplinarios.

# Capítulo 10

## Conclusión

Existe la necesidad de incrementar la investigación básica y aplicada en el proceso de fabricación de celdas solares de películas delgadas para lograr la migración de productos de nivel laboratorio a unos de mayor escala a nivel industrial. En esta tesis, IIRA, la cual es una arquitectura de referencia para la estandarización global de recursos y procesos de producción [5], se ha implementado al escenario de una línea de producción de celdas solares de películas delgadas, específicamente para CSSC y su relación con un método automático de deposición por rocío pirolítico. En esta tesis se ilustra un ciclo de vida del producto que comienza con la generación de conocimiento en un laboratorio de I&D multidisciplinario y concluye con un producto en forma de módulo de fábrica de aprendizaje.

El uso de un módulo de fábrica de aprendizaje en la universidad es una opción para incrementar el conocimiento en tecnologías y métodos novedosos, con el fin de optimizar la investigación en la producción de CSSC. Proporciona un entorno de aprendizaje altamente flexible y reconfigurable, que permite una configuración rápida de diferentes estructuras de métodos de manufactura. Adicionalmente, será posible reducir el costo y el riesgo de implementación, incluso antes de que se construya el verdadero módulo fábrica de aprendizaje, con el uso de:

1. Comisión virtual, ya que permitirá la planificación y prueba de nuevas estructuras de fábrica y sistemas de control.
2. Análisis de Big Data, ya que podría ayudar a generar escenarios virtuales hipotéticos como la optimización y reconfiguración en el monitoreo.

La aplicación de novedosos modelos de arquitectura de referencia [5], para la exploración de tendencias y tecnologías emergentes en el ámbito de la fabricación de celdas solares de películas delgadas [21, 24] son en su conjunto, amplias áreas multidisciplinarias que necesitan más investigación. Por lo tanto, tiene sentido probar estas tecnologías primero en condiciones industriales [34], para garantizar su futuro éxito en entornos industriales.

Con esta investigación se pretende que el módulo de fábrica de aprendizaje real, virtual o híbrida ayude a acercar la brecha entre el mundo real y virtual en el proceso de manufactura, a la vez que podría sincronizar la gran cantidad de datos generados por los dispositivos heterogéneos necesarios para I&D de celdas solares de películas delgadas. Lo cual podría ayudar a aumentar la compatibilidad entre los métodos de fabricación utilizados en pequeña y gran escala de la tercera generación de celdas solares, con un mejor aprovechamiento de las tendencias y tecnologías emergentes relacionadas con IIoT y la industria 4.0.

### **10.0.1. Trabajo a Futuro**

A partir de esta tesis se derivan diversas líneas de trabajo que se recomiendan seguir investigando:

- Ampliar el estudio de la automatización de la manufactura de CSSC con un enfoque en distintas escalas del producto y el volumen de la producción.
- Analizar a mayor profundidad los requerimientos del sistema siguiendo la metodología de IIRA a fin de implementar la infraestructura del modelo de fábrica de aprendizaje.
- Implementar tecnologías de software con base en la propuesta de la arquitectura del sistema.
- Ampliar el estudio entre la interoperabilidad de IIRA y RAMI 4.0.

# Bibliografía

- [1] Hugh Boyes, Bil Hallaq, Joe Cunningham, and Tim Watson. The industrial internet of things (iiot): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101:1 – 12, 2018.
- [2] Stephan Weyer, Torben Meyer, Moritz Ohmer, Dominic Gorecky, and Detlef Zühlke. Future modeling and simulation of cps-based factories: an example from the automotive industry. *IFAC-PapersOnLine*, 49(31):97 – 102, 2016. 12th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems IMS 2016.
- [3] Radu F. Babiceanu and Remzi Seker. Big data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: A survey of the current status and future outlook. *Computers in Industry*, 81:128 – 137, 2016. Emerging ICT concepts for smart, safe and sustainable industrial systems.
- [4] Eberhard Abele, George Chryssolouris, Wilfried Sihn, Joachim Metternich, Hoda ElMaraghy, Günther Seliger, Gunilla Sivard, Waguih ElMaraghy, Vera Hummel, Michael Tisch, and Stefan Seifermann. Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2):803 – 826, 2017.
- [5] G. Pedone and I. Mezgár. Model similarity evidence and interoperability affinity in cloud-ready industry 4.0 technologies. *Computers in Industry*, 100:278 – 286, 2018.
- [6] Francisco Fraile, Raquel Sanchis, Raul Poler, and Angel Ortiz. Reference models for digital manufacturing platforms. *Applied Sciences*, 9(20), 2019.
- [7] Abdel Salam Hamdy Makhlouf and Ion Tiginyanu. *Nanocoatings and ultra-thin films: technologies and applications*. Elsevier, 2011.
- [8] María de la Soledad Martín González. *Deposición electroquímica de películas superconductoras de alta temperatura crítica*. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, 2004.

- [9] John Venables. *Introduction to surface and thin film processes*. Cambridge University Press, 2000.
- [10] David B Hall, Patrick Underhill, and John M Torkelson. Spin coating of thin and ultrathin polymer films. *Polymer Engineering & Science*, 38(12):2039–2045, 1998.
- [11] Athanassios I Kontos, Athanassios G Kontos, Dimitrios S Tsoukleris, Marie-Claude Bernard, Nicolaos Spyrellis, and Polycarpos Falaras. Nanostructured tio2 films for dsscs prepared by combining doctor-blade and sol-gel techniques. *Journal of materials processing technology*, 196(1-3):243–248, 2008.
- [12] Morteza Eslamian. Spray-on thin film pv solar cells: advances, potentials and challenges. *Coatings*, 4(1):60–84, 2014.
- [13] Dolf Gielen. Renewable energy technologies: cost analysis series. *Sol photovolt*, 1(1):52, 2012.
- [14] Simon P Philipps, Andreas W Bett, Kelsey Horowitz, and Sarah Kurtz. Current status of concentrator photovoltaic (cpv) technology. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2015.
- [15] Bérenger Roth. *Operational stability of large scale OPV modules: interfaces, materials selection and stack design*. Department of Energy Conversion and Storage, Technical University of Denmark, 2016.
- [16] Buhle S Xakalashé and M Tangstad. Silicon processing: from quartz to crystalline silicon solar cells. *Chem Technol*, (March):6–9, 2012.
- [17] IEA Pvps. Trends 2015 in photovoltaic applications. *Report No. IEA-PVPS T1-27*, 2015.
- [18] Askari Mohammad Bagher, Mirzaei Mahmoud Abadi Vahid, and Mirhabibi Mohsen. Types of solar cells and application. *American Journal of optics and Photonics*, 3(5):94–113, 2015.
- [19] S Sharma, K Jain, and Ashutosh Sharma. A review on solar cells: In research and applications. *Materials Sciences and Applications*, 6:1145–1155, 2015.
- [20] Stephan Abermann. Non-vacuum processed next generation thin film photovoltaics: Towards marketable efficiency and production of czts based solar cells. *Solar Energy*, 94:37 – 70, 2013.

- [21] Markus Hösel, Henrik F. Dam, and Frederik C. Krebs. Development of lab-to-fab production equipment across several length scales for printed energy technologies, including solar cells. *Energy Technology*, 3(4):293–304, 2015.
- [22] V A Milichko, A S Shalin, I S Mukhin, A E Kovrov, A A Krasilin, A V Vinogradov, P A Belov, and C R Simovski. Solar photovoltaics: current state and trends. *Physics-Uspokhi*, 59(8):727–772, aug 2016.
- [23] Doojin Vak, Kyeongil Hwang, Andrew Faulks, Yen-Sook Jung, Noel Clark, Dong-Yu Kim, Gerard J. Wilson, and Scott E. Watkins. 3d printer based slot-die coater as a lab-to-fab translation tool for solution-processed solar cells. *Advanced Energy Materials*, 5(4):1401539, 2015.
- [24] Paolo Mariani, Luigi Vesce, and Aldo Di Carlo. The role of printing techniques for large-area dye sensitized solar cells. *Semiconductor Science and Technology*, 30(10):104003, sep 2015.
- [25] A. Nakaruk and C. C. Sorrell. Conceptual model for spray pyrolysis mechanism: fabrication and annealing of titania thin films. *Journal of Coatings Technology and Research*, 7:665 – 676, 2010.
- [26] Dainius Perednis and Ludwig J. Gauckler. Thin film deposition using spray pyrolysis. *Journal of Electroceramics*, 14:103 – 111, 2005.
- [27] Jae-Wook Kang, Yong-Jin Kang, Sunghoon Jung, Myungkwan Song, Do-Geun Kim, Chang Su Kim, and Soo H Kim. Fully spray-coated inverted organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 103:76–79, 2012.
- [28] Aniello Falco, Lucio Cina, Giuseppe Scarpa, Paolo Lugli, and Alaa Abdellah. Fully-sprayed and flexible organic photodiodes with transparent carbon nanotube electrodes. *ACS applied materials & interfaces*, 6(13):10593–10601, 2014.
- [29] Masayuki Okuya, Koji Nakade, and Shoji Kaneko. Porous tio2 thin films synthesized by a spray pyrolysis deposition (spd) technique and their application to dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 70(4):425 – 435, 2002.
- [30] Edgar A. Reynoso-Soto, Jorge L. Alonso-Perez, Balter Trujillo-Navarrete, and Nohe R. Cazarez-Castro. Automatización en la deposición de películas delgadas de nanomateriales para la posible utilización en celdas solares (automatization in the deposition of nanomaterial-based thin-films for the potential use in solar cells). *Revista de Tecnología e Innovación*, 3(7):51 – 59, 2016.

- [31] Jorge L. Alonso-Perez, Edgar A. Reynoso-Soto, Balter Trujillo-Navarrete, and Nohe R. Cazarez-Castro. Fabricación automatizada de películas delgadas compactas en el desarrollo de celdas solares tipo grätzel (automated manufacturing of compact thin-films for the development of dye-sensitized solar cells). *Revista de Tecnología e Innovación*, 4(11):36 – 42, 2016.
- [32] B. Nelson, S. Robbins, and P. Sheldon. The ncpv process integration project: purpose, status, and direction. In *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.*, pages 243–246, Jan 2005.
- [33] Szu-Hao Huang and Ying-Cheng Pan. Automated visual inspection in the semiconductor industry: A survey. *Computers in Industry*, 66:1 – 10, 2015.
- [34] Fei Tao, Jiangfeng Cheng, Qinglin Qi, Meng Zhang, He Zhang, and Fangyuan Sui. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int J Adv Manuf Technol*, 94:3563 – 3576, 2018.
- [35] Ying Cheng, Yongping Zhang, Ping Ji, Wenjun Xu, Zude Zhou, and Fei Tao. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey. *Int J Adv Manuf Technol*, 97:1209 – 1221, 2018.
- [36] StabilityGroup. Business analytics. <https://www.stabilitygroup.in/business-analytics/>, 2020.
- [37] Adrian Dumitrascu, Laurențiu Nae, and Nicolae Predincea. Virtual commissioning a final spet in digital validation on the robotic manufacturing systems. *Journal Proceedings in Manufacturing Systems*, 9(4):215–220, 2014.
- [38] Peter Hoffmann, Reimar Schumann, Talal M A Maksoud, and Giuliano C. Premier. Virtual commissioning of manufacturing systems a review and new approaches for simplification. In *In Proc. 24th European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2010*, pages 175–181, 2010.
- [39] Nancy Velásquez, Elsa Estevez, and Patricia Pesado. Cloud computing, big data and the industry 4.0 reference architectures. *Journal of Computer Science and Technology*, 18(03):e29, Dec. 2018.
- [40] Ulrich Löwen, Annerose Braune, Markus Diesner, Guido Huettemann, Matthias Klein, Mario Thron, Tobias Manger, Michael Okon, and Robert Kochseder. Exemplification of the industrie 4.0 application scenario value-based service following iira structure. 04 2017.

- [41] S.W. Lin, B. Durand, G. Bleakley, A. Chigani, R. Martin, Brett Murphy, and M. Crawford. The industrial internet of things volume g1: Reference architecture. iic technical white paper. 2019.
- [42] electroindustria. arquitecturas de referencia rami 4.0. <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2856&srch=&act=4&tip=7>, 2020.
- [43] Seigo Ito, Takurou N. Murakami, Pascal Comte, Paul Liska, Carole Grätzel, Mohammad K. Nazeeruddin, and Michael Grätzel. Fabrication of thin film dye sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10%. *Thin Solid Films*, 516(14):4613 – 4619, 2008. 6th International Conference on Coatings on Glass and Plastics (ICCG6)- Advanced Coatings for Large-Area or High-Volume Products-.
- [44] J. Alonso-Perez. Desarrollo de un sistema de deposición por rocío automatizado para la síntesis de películas delgadas de tio2.tesis para obtener el título de maestría en ciencias de la ingeniería, tijuana, bc. tecnológico nacional de méxico/instituto tecnológico de tijuana. 2016.
- [45] linuxcnc. linuxcnc. <http://linuxcnc.org/>, 2020.
- [46] W. Diab, K.E. Harper, D.S.-W. Lin, and W. Sobel. Industrial analytics: The engine driving the iiot revolution. iic technical white paper. page 19, 2017.
- [47] A. Braune, C. Diedrich, S. Grüner, G. Huettemann, M. Klein, Christoph Legat, M. Lieke, Ulrich Löwen, Mario Thron, T. Usländer, Alexander Belyaev, M. Okon, G. Walter, and G. Stephan. Usage view of asset administration shell, brochure. page 48, 2019.
- [48] William S Harrison III and Frederick Proctor. Virtual fusion: state of the art in component simulation/emulation for manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 1:110–121, 2015.
- [49] Alonso-Perez Jorge, Cazarez-Castro Nohe, and Reynoso-Soto Edgar Alonso. Analizando el middleware ros para una posible implementación en un sistema basado en cloud computing. *Avances Científicos y Tecnológicos de las Aplicaciones de las Redes de Computadoras*, page 46.
- [50] Morgan Quigley, Ken Conley, Brian Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Rob Wheeler, and Andrew Y Ng. Ros: an open-source robot operating system. In *ICRA workshop on open source software*, volume 3, page 5. Kobe, Japan, 2009.

- [51] OSRF ROS. <https://www.ros.org/>, 2020.
- [52] Morgan Quigley, Brian Gerkey, and William D Smart. *Programming Robots with ROS: a practical introduction to the Robot Operating System*. "O'Reilly Media, Inc.", 2015.
- [53] Kevin S Swanson, Alexander A Brown, Sean N Brennan, and Cynthia M LaJambe. Extending driving simulator capabilities toward hardware-in-the-loop testbeds and remote vehicle interfaces. In *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops (IV Workshops)*, pages 115–120. IEEE, 2013.
- [54] Marcin Odelga, Paolo Stegagno, Heinrich H Bülthoff, and Aamir Ahmad. A setup for multi-uav hardware-in-the-loop simulations. In *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*, pages 204–210. IEEE, 2015.
- [55] OSRF. Gazebo. <http://gazebosim.org/>, 2020.
- [56] Nathan Koenig and Andrew Howard. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566)*, volume 3, pages 2149–2154. IEEE, 2004.
- [57] Suthida Thongnuch and Alexander Fay. A practical simulation model generation for virtual commissioning. In *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pages 1077–1082. IEEE, 2017.
- [58] Xi Vincent Wang, Lihui Wang, Abdullah Mohammed, and Mohammad Givehchi. Ubiquitous manufacturing system based on cloud: A robotics application. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 45:116–125, 2017.
- [59] D. Matias-Dominguez, N. Cazarez-Castro, A. Martinez-Graciliano, S. Cardenas-Maciell, and J. Alonso-Perez. Propuesta de una arquitectura distribuida orientada a servicios para la adopción de la industria 4.0 en la manufactura de celdas solares. conference: V congreso internacional de robotica y control. at: Los cabos, baja california sur, mexico. 2018.
- [60] Kafka Apache. Apache kafka. <https://kafka.apache.org/>, 2020.
- [61] Storm Storm. Apache storm. <https://storm.apache.org/>, 2020.

- [62] Supun Kamburugamuve, Leif Christiansen, and Geoffrey Fox. A framework for real time processing of sensor data in the cloud. *Journal of Sensors*, 2015, 2015.
- [63] Cassandra Cassandra. Apache cassandra. <https://cassandra.apache.org/>, 2020.
- [64] Spark Spark. Apache spark -unified analytics engine for big data. <https://spark.apache.org/>, 2020.