

**BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI**



TRẦN MINH HÙNG

**GIẢI PHÁP HỆ THỐNG THÔNG TIN CHO TÒA NHÀ
THÔNG MINH TRÊN CƠ SỞ CPS/IOT**

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ HỆ THỐNG THÔNG TIN

Hà Nội – 2025

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI



TRẦN MINH HÙNG

GIẢI PHÁP HỆ THỐNG THÔNG TIN CHO TÒA NHÀ
THÔNG MINH TRÊN CƠ SỞ CPS/IOT

Ngành: Hệ thống thông tin

Mã số: 8480104

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ HỆ THỐNG THÔNG TIN

NGƯỜI HƯỚNG DẪN:

TS. HÀ MẠNH ĐÀO

Hà Nội – 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi tên là Trần Minh Hùng, là tác giả của đề án báo cáo khoa học với tiêu đề “ GIẢI PHÁP HỆ THỐNG THÔNG TIN CHO TÒA NHÀ THÔNG MINH TRÊN CƠ SỞ CPS/IOT” này. Tôi xin cam đoan rằng toàn bộ nội dung, kết quả nghiên cứu, số liệu và thông tin được trình bày trong đề án này là do tôi tự thực hiện và không sao chép từ bất kỳ nguồn nào khác mà không ghi rõ trích dẫn.

Tôi cam kết rằng tất cả các tài liệu tham khảo đã được sử dụng đều được liệt kê đầy đủ và rõ ràng trong phần tài liệu tham khảo của báo cáo. Nếu phát hiện bất kỳ sự gian lận hoặc vi phạm nào liên quan đến quyền sở hữu trí tuệ trong đề án này, tôi xin chịu hoàn toàn trách nhiệm và sẵn sàng chịu mọi hình thức xử lý theo quy định của nhà trường cũng như pháp luật.

Tôi xin chân thành cảm ơn sự hướng dẫn và hỗ trợ của TS. Hà Mạnh Đào đã giúp đỡ tôi trong quá trình thực hiện đề án này.

Hà Nội, ngày tháng năm 2025

Học viên thực hiện

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành đến các thầy cô giáo và các đồng nghiệp đã hỗ trợ tôi trong suốt quá trình thực hiện đề án khoa học “Giải pháp hệ thống thông tin cho tòa nhà thông minh trên cơ sở CPS/IoT.” Sự hướng dẫn tận tâm và những góp ý quý báu của các thầy cô không chỉ giúp tôi có cái nhìn sâu sắc hơn về các khái niệm liên quan đến hệ thống thông tin thông minh và CPS/IoT mà còn tạo nền tảng vững chắc để tôi hoàn thiện đề án này.

Tôi cũng xin chân thành cảm ơn các tổ chức và cá nhân đã cung cấp tài liệu, thông tin và nguồn lực cần thiết cho quá trình nghiên cứu. Nhờ có sự hỗ trợ này, tôi đã có cơ hội mở rộng kiến thức, thực hiện các thử nghiệm thực tế và đạt được những kết quả có ý nghĩa trong đề tài này.

Cuối cùng, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn đến gia đình, bạn bè và đồng nghiệp, những người đã luôn động viên và ủng hộ tôi vượt qua những khó khăn trong quá trình làm đề án. Những tình cảm và sự hỗ trợ từ các bạn là nguồn động lực vô cùng lớn lao để bản thân tôi hoàn thành tốt nhất công việc của mình.

Một lần nữa, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành đến tất cả mọi người.

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN.....	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC.....	iii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC TỪ VIẾT TẮT.....	viii
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	ix
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ.....	x
MỞ ĐẦU	1
1. LÝ DO CHỌN ĐỀ TÀI.....	1
2. MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU.....	2
3. PHẠM VI NGHIÊN CỨU	2
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ TÒA NHÀ THÔNG MINH VÀ CPS/IOT	4
1.1. KHÁI NIỆM VỀ TÒA NHÀ THÔNG MINH.....	4
1.2. MÔ HÌNH HÓA KIẾN TRÚC TÒA NHÀ THÔNG MINH.....	5
1.2.1. Tầng thiết bị cảm biến và điều khiển.....	6
1.2.2. Tầng điều phối và hạ tầng số.....	6
1.2.3. An ninh trong tòa nhà thông minh.....	7
1.2.4. Vai trò trung tâm của con người.....	7
1.2.5. Kết luận về mô hình hệ thống tòa nhà thông minh	8
1.3. CPS/IOT VÀ ỨNG DỤNG CỦA CHÚNG TRONG THIẾT KẾ TÒA NHÀ THÔNG MINH.....	8
1.3.1. CPS (Cyber-Physical Systems)	8
1.3.2. IOT (Internet of things)	12

1.3.3. Sự kết hợp và mối quan hệ giữa CPS và IoT trong hệ thống tòa nhà thông minh.....	19
1.4. THIẾT KẾ HỆ THỐNG TÒA NHÀ THÔNG MINH TRÊN CƠ SỞ CPS/IOT	21
1.4.1. Thiết kế kiến trúc phân tầng (Layered Architectural Design).....	21
1.4.2. Thiết kế kiến trúc hướng hành vi người dùng (Human-Centric Design)	22
1.4.3. Thiết kế định hướng an ninh và quyền riêng tư (Security and Privacy-by-Design)	22
1.4.4. Thiết kế mô-đun hóa và khả năng mở rộng (Modular & Scalable Design)	23
1.4.5. Thiết kế mô phỏng và kiểm chứng (Model-based Systems Engineering – MBSE).....	23
1.5. CÁC CÔNG NGHỆ, CÔNG CỤ ĐỂ PHÁT TRIỂN TÒA NHÀ THÔNG MINH DỰA TRÊN CƠ SỞ CPS/IOT	24
1.5.1. Công nghệ cảm biến và Internet of Things	24
1.5.2. Công nghệ truyền thông và kết nối.....	25
1.5.3. Nền tảng phân tích dữ liệu và trí tuệ nhân tạo.....	25
1.5.4. Công nghệ điện toán đám mây và biên (Cloud & Edge Computing)	26
1.5.5. Công nghệ an ninh mạng và bảo mật hệ thống	26
1.5.6. Công nghệ mô hình hóa, mô phỏng và triển khai	26
1.5.7. Giao diện người dùng và nền tảng điều khiển.....	26
1.6. KẾT LUẬN CHƯƠNG 1	27
CHƯƠNG 2. GIẢI PHÁP HỆ THỐNG THÔNG TIN CHO TÒA NHÀ THÔNG MINH VỚI CPS/IOT	28

2.1. VẤN ĐỀ TỒN TẠI CỦA CPS/IOT ĐỐI VỚI CÁC HỆ THỐNG QUẢN LÝ	28
2.2. CÁC THÁCH THỨC VÀ GIẢI PHÁP TRONG PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG CPS/IOT	30
2.2.1. Phần mềm trung gian (middleware) cho phát triển và quản lý dịch vụ	30
2.2.2. Chất lượng dữ liệu	34
2.2.3. Thành phần dịch vụ và mô hình tính toán	34
2.2.4. Khả năng chịu lỗi.....	35
2.2.5. Sự ổn định của mạng internet.....	35
2.3. TỔNG THỂ KIẾN TRÚC HỆ THỐNG	38
2.3.1. Tầng Thiết bị (Device Layer)	38
2.3.2. Tầng Truyền thông (Communication Layer)	38
2.3.3. Tầng Xử lý Dữ liệu (Data Processing Layer).....	38
2.3.4. Tầng Ứng dụng (Application Layer).....	38
2.4. MỘT SỐ THÀNH PHẦN CHÍNH CỦA HỆ THỐNG IOT/CPS TRONG TÒA NHÀ THÔNG MINH	39
2.5. QUY TRÌNH TỰ ĐỘNG HÓA TRONG TÒA NHÀ HỆ THỐNG THÔNG MINH	40
2.6. THIẾT KẾ HỆ THỐNG TÒA NHÀ THÔNG MINH TRÊN CƠ SỞ CPS/IOT	42
2.6.1. Đơn vị giám sát thiết bị điện tử và điện gia dụng	43
2.6.2. Đơn vị giám sát nhiệt độ.....	44
2.6.3. Bộ cảm biến tiếp xúc cho đồ vật trong nhà	45
2.6.4. Đơn vị cảm biến lực	45

2.6.5.	Thiết kế hệ thống nhận dạng ADL	45
2.6.6.	Chức năng chăm sóc sức khỏe	47
2.7.	ÁP DỤNG VÀO HỆ THỐNG TÒA NHÀ THÔNG MINH.....	48
2.8.	PHÂN TÍCH THIẾT KẾ VÀ MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG TÒA NHÀ THÔNG MINH	55
2.8.1.	Lý do lựa chọn SysML để mô hình hóa và áp dụng cho hệ thống tòa nhà thông minh.....	55
2.8.2.	Phần mềm thiết kế hệ thống	56
2.8.3.	Thiết kế tổng quan	57
2.9.	MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG TÒA NHÀ THÔNG MINH TRÊN CƠ SỞ CPS/IOT	67
2.9.1.	Model Sensor (Hệ thống cảm biến).....	67
2.9.2.	Model HVAC System (Hệ thống điều hòa không khí)	68
2.9.3.	Model Security (Hệ thống an ninh)	68
2.9.4.	Model Lighting (Hệ thống chiếu sáng)	69
2.9.5.	Model Energy (Hệ thống năng lượng)	69
2.10.	KẾT LUẬN CHƯƠNG 2	70
CHƯƠNG 3. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ.....		71
3.1.	PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM.....	71
3.2.	KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM	72
3.3.	GIẢ LẬP KỊCH BẢN	76
3.3.1.	Kịch bản 1: TN001 - Ngày thường.....	76
3.3.2.	Kịch bản 2: TN002 - Nắng nóng cực điểm	77
3.3.3.	Kịch bản 3: TN003 - Tiết kiệm năng lượng	78
3.3.4.	Kịch bản 4: TN004 - Sự cố an ninh.....	79

3.4. KẾT LUẬN THỰC NGHIỆM	80
KẾT LUẬN	86
TÀI LIỆU THAM KHẢO	88
PHỤ LỤC	89

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC TỪ VIẾT TẮT

STT	Từ viết tắt	Tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
1	CPS	Cyber-Physical Systems	Hệ thống kết nối không gian tính toán - vật lý
2	IOT	Internet Of Thing	Internet kết nối vạn vật
3	HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning	Hệ thống quản lý thông gió, không khí và nhiệt độ
4	DR/ToU	Demand-Response / Time of Use	Demand-Response (Phản ứng phía cầu - DR) và Time-of-Use (Giờ sử dụng - TOU)
5	ROI	Return on Investment	Tỷ suất lợi nhuận trên đầu tư
6	MPC	Model Predictive Control	Điều khiển Dự báo Mô hình

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 3.1. Bảng kịch bản thử nghiệm.....	71
---	----

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Mô hình hệ thống tòa nhà thông minh	5
Hình 1.2. Mô hình mối quan hệ CPS đối với mọi lĩnh vực	10
Hình 1.3. Mô hình hệ thống IoT trong thành phố thông minh (Internet of Thing)	13
Hình 2.1. Ví dụ về những nhiệm vụ nan giải nhưng không kém phần quan trọng CPS/IOT trong hệ thống tòa nhà thông minh và thành phố thông minh. a) ATCS, b) Hệ thống điều khiển giao thông thông minh, c) Nhà xanh thông minh, d) Hệ thống quản lý nhiệt độ trong phòng server	29
Hình 2.2. Sơ đồ cấu trúc ngôi nhà với các cảm biến được triển khai trong các đồ vật trong nhà.....	43
Hình 2.3. (a,b) biểu diễn đơn vị giám sát và kiểm soát việc sử dụng thiết bị điện và điện tử và (c–h) biểu diễn việc giám sát và kiểm soát các thiết bị gia dụng thông qua đơn vị này; (i) biểu diễn đơn vị cảm biến lực và (j–l) triển khai đơn vị cho các vật thể dùng để ngồi cũng như ngủ khác nhau; (m,n) biểu diễn cách sắp xếp đơn vị cảm biến tiếp xúc	44
Hình 2.4. (a,b) biểu diễn đơn vị giám sát nhiệt độ bên ngoài dựa trên năng lượng mặt trời tái tạo; (c) đơn vị giám sát nhiệt độ bên trong và (d) cảm biến PIR để giám sát hoạt động.....	44
Hình 2.5. Nhận dạng hoạt động được chia thành ba cấp độ khác nhau.....	47
Hình 2.6. Mô tả chức năng của hệ thống giám sát nhà thông minh đã phát triển	48
Hình 2.7. Bố cục tòa nhà thể hiện vị trí đặt cảm biến.....	48
Hình 2.8. Vị trí đặt cảm biến trong phòng	49
Hình 2.6. Biểu đồ block definition diagram.....	57
Hình 2.7. Biểu đồ internal block diagram.....	59
Hình 2.8. UseCase diagram.....	61
Hình 2.10: biểu đồ hoạt động của chức năng thống kê năng lượng sử dụng.....	65
Hình 2.11. Biểu đồ yêu cầu cơ bản của hệ thống tòa nhà thông minh	66

Hình 2.13. Model HVAC System	68
Hình 2.14. Model Security System	68
Hình 2.15. Model Lighting System.....	69
Hình 2.16. Model Energy System.....	69
Hình 3.1. Tham số đầu vào để giả lập.....	73
Hình 3.2. Thông số dựa trên mối quan hệ giữa tổng tải và năng lượng thu được từ năng lượng mặt trời, trục x là times, y là kw	74
Hình 3.3. Thông số dựa trên mối quan hệ giữa tổng tải điện mặt trời và năng lượng mặc định, mức pin, dung tích pin và tổng năng lượng tiêu thụ, trục x là times, y là kw	74
Hình 3.4. Quan hệ giữa công suất điện mặt trời phát ra và tổng tải	75
Hình 3.6: Là đường cơ sở các chiến lược tối ưu.....	77
.....	78
Hình 3.9: Dòng thời gian kích hoạt báo động và phát hiện xâm nhập.	80
Hình 4.0. Text-based Model SensorSystem.....	89
Hình 4.1. Text-based Model HVACSystem	90
Hình 4.2. Text-based Model SecuritySystem	91
Hình 4.3. Text-based Model EnergySystem	92
Hình 4.5. Text-based Model SmartBuilding System	93

MỞ ĐẦU

1. LÝ DO CHỌN ĐỀ TÀI

Trong bối cảnh hiện nay, công nghệ thông tin và truyền thông đang trở thành nền tảng của mọi sự đổi mới và phát triển trên toàn cầu. Những tiến bộ vượt bậc trong lĩnh vực trí tuệ nhân tạo (AI), hệ thống điều khiển và giám sát qua Internet (IoT), cùng với các hệ thống vật lý không gian mạng (CPS) đã và đang tạo ra bước ngoặt lớn trong việc tối ưu hóa quản lý và vận hành các hệ thống công nghiệp, y tế, giao thông và đặc biệt là các công trình xây dựng thông minh. Ý tưởng về một tòa nhà thông minh không chỉ đơn giản là việc tự động hóa các chức năng mà còn là sự tích hợp các công nghệ mới nhất, nhằm tối ưu hóa hiệu quả sử dụng tài nguyên, nâng cao mức độ an toàn, tiện nghi và bền vững trong tương lai. Đó chính là nguồn cảm hứng và động lực mạnh mẽ để tôi chọn đề tài “Giải pháp hệ thống thông tin cho tòa nhà thông minh trên cơ sở CPS/IoT”.

Thêm vào đó, với tốc độ đô thị hóa ngày càng cao, nhu cầu về các tòa nhà thông minh với khả năng quản lý hiệu quả ngày càng trở nên cấp thiết. Sự gia tăng dân số đô thị không chỉ tạo áp lực lớn đối với cơ sở hạ tầng mà còn đối với việc sử dụng năng lượng, quản lý an ninh và bảo vệ môi trường. Đề tài này được tôi lựa chọn với mong muốn xây dựng một giải pháp có thể đáp ứng nhu cầu phát triển đô thị bền vững, góp phần tạo ra những tòa nhà không chỉ thông minh mà còn thân thiện với môi trường, tiết kiệm năng lượng và đảm bảo chất lượng cuộc sống cho cư dân.

Hệ thống thông tin cho tòa nhà thông minh trên nền tảng CPS/IoT không chỉ cung cấp khả năng giám sát và quản lý theo thời gian thực mà còn có khả năng tự động hóa và phân tích dữ liệu một cách hiệu quả. CPS, với sự kết hợp giữa các hệ thống vật lý và mạng lưới thông tin, đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra một hệ sinh thái thông minh giúp tăng cường khả năng điều khiển và giám sát các thiết bị, hệ thống trong tòa nhà một cách chính xác và hiệu quả. Trong khi đó, IoT

mở rộng khả năng kết nối và tương tác giữa các thiết bị với nhau, giúp tăng tính linh hoạt và hiệu quả trong quản lý.

Ngoài ra, đề tài này còn là một cơ hội để tôi thử nghiệm và áp dụng những kiến thức chuyên môn, kỹ năng kỹ thuật đã học vào một lĩnh vực đầy triển vọng và nhiều thách thức. Qua việc nghiên cứu và triển khai các giải pháp về CPS/IoT cho hệ thống thông tin của tòa nhà, tôi kỳ vọng sẽ không chỉ mở rộng hiểu biết về các công nghệ mới mà còn đóng góp một phần vào xu hướng phát triển đô thị thông minh tại Việt Nam, nơi mà các giải pháp công nghệ tiên tiến đang rất cần thiết để đáp ứng nhu cầu của một xã hội ngày càng phát triển.

Với tất cả những lý do trên, tôi tin rằng đề tài này có ý nghĩa thiết thực và đầy tính cấp bách, là cơ hội để bản thân phát triển kiến thức, kỹ năng, đồng thời đóng góp cho sự phát triển của công nghệ thông tin trong việc xây dựng các tòa nhà thông minh, phục vụ cộng đồng và xã hội.

2. MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU

Mục tiêu nghiên cứu của đề tài "Giải pháp hệ thống thông tin cho tòa nhà thông minh trên cơ sở CPS/IoT" là xây dựng một hệ thống tích hợp thông minh, có khả năng quản lý và vận hành hiệu quả các tòa nhà hiện đại, đồng thời đảm bảo tính an toàn, tiết kiệm năng lượng và thân thiện với môi trường.

3. PHẠM VI NGHIÊN CỨU

Phạm vi nghiên cứu của đề tài bao gồm việc xây dựng và phát triển giải pháp hệ thống thông tin cho tòa nhà thông minh trên nền tảng CPS/IoT, với trọng tâm là kiến trúc hệ thống, mô hình tích hợp CPS và IoT, cùng các giải pháp tự động hóa quản lý, giám sát năng lượng và bảo mật thông tin. Đề tài tập trung vào các ứng dụng thực tiễn trong quản lý các hệ thống chiếu sáng, điều hòa, an ninh và tiết kiệm năng lượng trong tòa nhà. Những yếu tố như giao diện người dùng và công nghệ phân tích dữ liệu cũng được nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu quả vận hành và trải nghiệm người dùng.

4. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Kết hợp phương pháp nghiên cứu lý thuyết với thực nghiệm:

Phương pháp lý thuyết: Nghiên cứu tổng hợp các kiến nền tảng và liên quan đến đề tài nghiên cứu. Cụ thể nghiên cứu về mô hình tòa nhà thông minh, hệ thống quản lý tòa nhà thông minh, mô hình IoT, CPS. Sau đó đề xuất một giải pháp quản lý tòa nhà thông minh trên cơ sở tích hợp mô hình CPS/IoT với phương pháp MBSE và mô hình hóa bằng công cụ SysML.

Phương pháp thực nghiệm: Tiến hành xây dựng mô hình thử nghiệm và tiến hành các kịch bản thử nghiệm, mô phỏng để đánh giá kết quả đạt được của giải pháp.

5. BỐ CỤC ĐỀ ÁN:

Đề án gồm 3 chương:

- Chương 1: Tổng quan về tòa nhà thông minh: Trong chương này sẽ nêu những cơ sở lý thuyết về hệ thống, kiến trúc tòa nhà thông minh, mô hình hóa kiến trúc. Bên cạnh đó cũng nêu một số lý thuyết quan trọng về cơ sở CPS/IoT.
- Chương 2: Giải pháp về hệ thống thông tin cho tòa nhà thông minh với CPS/IoT: Từ những cơ sở lý thuyết quan trọng ở chương 1, chương này tổng hợp những thách thức, quy trình và thiết kế mô hình hóa bằng công cụ SysML để làm cơ sở thực nghiệm cho chương 3.
- Chương 3: Thực nghiệm và đánh giá: Từ những thiết kế mô hình, sơ đồ SysML ở chương 2, chương 3 sẽ thực nghiệm và mô hình hóa hệ thống tòa nhà thông minh vào ngôn ngữ Open Modelica để đánh giá mô hình và từ đó đưa ra kết luận.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ TÒA NHÀ THÔNG MINH VÀ CPS/IOT

1.1. KHÁI NIỆM VỀ TÒA NHÀ THÔNG MINH

Tòa nhà thông minh (Smart Building) là một khái niệm về các công trình được trang bị hệ thống tự động hóa tiên tiến, cho phép giám sát, quản lý và điều khiển các yếu tố trong tòa nhà một cách thông minh, hiệu quả. Mục tiêu của tòa nhà thông minh là tối ưu hóa sự tiện nghi, an toàn và hiệu quả sử dụng năng lượng, đồng thời cải thiện chất lượng môi trường sống cho người dùng. Các công nghệ hiện đại như Internet vạn vật (IoT), hệ thống mạng điều khiển vật lý (Cyber-Physical Systems - CPS), trí tuệ nhân tạo (AI), và dữ liệu lớn (Big Data) được ứng dụng để thu thập và phân tích dữ liệu từ các cảm biến, thiết bị và hệ thống quản lý tòa nhà.

Cốt lõi của tòa nhà thông minh là các cảm biến và thiết bị IoT được phân bố ở nhiều khu vực, giúp giám sát và phản hồi thông tin về ánh sáng, nhiệt độ, độ ẩm, hệ thống điều hòa không khí, an ninh, và tiêu thụ năng lượng. Những dữ liệu này được truyền về hệ thống trung tâm để phân tích và đưa ra các quyết định tự động nhằm tối ưu hóa việc vận hành tòa nhà. Chẳng hạn, khi cảm biến phát hiện có người trong phòng, hệ thống sẽ tự động điều chỉnh ánh sáng và nhiệt độ, giúp tiết kiệm năng lượng khi không có ai sử dụng.

Hơn nữa, tòa nhà thông minh cũng tăng cường tính an toàn nhờ các hệ thống an ninh như camera giám sát, khóa thông minh, hệ thống kiểm soát truy cập tự động và bảo mật mạng. Các giải pháp này không chỉ đảm bảo an toàn cho cư dân mà còn cho phép quản lý tòa nhà kiểm soát tình hình an ninh mọi lúc, mọi nơi.

Về mặt môi trường, tòa nhà thông minh góp phần đáng kể vào việc giảm lượng khí thải và tiêu thụ tài nguyên. Tính năng quản lý năng lượng và bảo trì dự đoán giúp giảm thiểu chi phí vận hành, đồng thời kéo dài tuổi thọ thiết bị. Ví dụ,

khi hệ thống cảm biến phát hiện ra dấu hiệu của việc thiết bị cần bảo trì, nó sẽ thông báo ngay để bảo trì trước khi hỏng hóc nghiêm trọng xảy ra.

Với sự phát triển của các công nghệ như trí tuệ nhân tạo và dữ liệu lớn, tòa nhà thông minh ngày càng tiến hóa để hiểu và học hỏi từ hành vi của người dùng, cung cấp các trải nghiệm cá nhân hóa và linh hoạt hơn. Qua đó, tòa nhà thông minh không chỉ là công trình hiện đại mà còn là một phần quan trọng trong hệ sinh thái đô thị thông minh, tạo nên môi trường sống bền vững và tiện nghi cho cộng đồng.

Nhìn chung, khái niệm tòa nhà thông minh không chỉ dừng lại ở việc ứng dụng công nghệ để tự động hóa, mà còn là sự kết hợp hài hòa giữa công nghệ và cuộc sống, góp phần định hình tương lai của các khu đô thị hiện đại.

1.2. MÔ HÌNH HÓA KIẾN TRÚC TÒA NHÀ THÔNG MINH



Hình 1.1. Mô hình hệ thống tòa nhà thông minh

1.2.1. Tầng thiết bị cảm biến và điều khiển

Tầng thấp nhất trong kiến trúc là hệ thống cảm biến và thiết bị điều khiển được phân bố khắp các khu vực chức năng của tòa nhà, đóng vai trò thu thập dữ liệu từ môi trường và thực hiện các tác vụ điều khiển:

Cảm biến hiện diện (Occupancy Sensors): xác định mức độ có mặt của người trong các khu vực khác nhau, hỗ trợ điều khiển chiếu sáng và điều hòa tối ưu.

Cảm biến chất lượng không khí (Air Quality Sensors) và cảm biến nhiệt độ và độ ẩm: theo dõi các chỉ số môi trường như CO₂, VOC, nhiệt độ, độ ẩm,... để đảm bảo sức khỏe người cư trú.

Hệ thống HVAC: tự động điều chỉnh nhiệt độ, thông gió và điều hòa dựa trên dữ liệu cảm biến và hành vi người dùng.

Hệ thống kiểm soát thang máy và truy cập (Elevator & Access Control): đảm bảo di chuyển an toàn, kiểm soát quyền truy cập theo thời gian thực.

Thiết bị giám sát (Surveillance) và báo cháy (Fire Control): cung cấp lớp bảo vệ an toàn vật lý quan trọng cho người cư trú và tài sản.

Các đồng hồ đo năng lượng (Energy Meters) và hệ thống tưới nước, đèn chiếu sáng, thiết bị hiển thị,... tạo nên hệ sinh thái quản lý năng lượng và tiện ích toàn diện.

1.2.2. Tầng điều phối và hạ tầng số

Các thiết bị cảm biến và điều khiển gửi dữ liệu về trung tâm điều phối thông qua các hạ tầng mạng được bảo vệ. Lõi xử lý chính của hệ thống bao gồm:

Hạ tầng điện toán đám mây tại chỗ (On-Prem Cloud Infrastructure): lưu trữ và xử lý cục bộ dữ liệu có độ nhạy cao.

Phân tích thời gian thực (Real-Time Analytics): xử lý dòng dữ liệu liên tục để đưa ra quyết định điều khiển tức thời.

Tính toán kết nối (Connected Computing): cho phép người dùng tương tác với hệ thống thông qua các thiết bị di động, màn hình hiển thị, ứng dụng web,...

Kiến trúc này hỗ trợ khả năng mở rộng linh hoạt, đồng thời đảm bảo độ trễ thấp và tính khả dụng cao – các yếu tố quan trọng trong các tình huống khẩn cấp hoặc điều kiện sống thay đổi nhanh.

1.2.3. An ninh trong tòa nhà thông minh

Sự phân tán của các thiết bị và độ mở của hệ thống mạng khiến kiến trúc này dễ bị tổn thương trước các cuộc tấn công mạng. Như trong sơ đồ minh họa, nhiều điểm kết nối – từ hệ thống cảm biến ánh sáng, điều khiển HVAC, đến các thiết bị hiển thị video và điều khiển thang máy – đều có khả năng trở thành mục tiêu của hacker hoặc các mã độc tự động:

Tấn công từ xa (Remote Exploits) có thể làm gián đoạn vận hành, chiếm quyền kiểm soát hệ thống HVAC hoặc cảm biến.

Chiếm đoạt quyền điều khiển thang máy hoặc hệ thống truy cập có thể gây nguy hiểm đến an toàn vật lý cho cư dân.

Tấn công vào dữ liệu hành vi và cảm biến hiện diện có thể xâm phạm nghiêm trọng quyền riêng tư.

Khai thác điểm yếu từ thiết bị IoT giá rẻ, ít được vá lỗi, để làm bàn đạp cho các cuộc tấn công chuỗi cung ứng (supply chain attacks).

1.2.4. Vai trò trung tâm của con người

Tòa nhà thông minh không nên được xem là một hệ thống độc lập, mà phải được thiết kế theo hướng lấy con người làm trung tâm (Human-Centric Design). Trong kiến trúc này:

Người cư trú là người thụ hưởng và đồng thời là nguồn cung cấp dữ liệu cho hệ thống. Hành vi, trạng thái sinh lý, và thói quen sống đều được hệ thống học tập và phản hồi.

Kỹ sư vận hành là mắt xích giữa thế giới vật lý và kỹ thuật số, cần có công cụ trực quan để giám sát và xử lý sự cố.

Chuyên gia an ninh mạng cần được tích hợp vào chuỗi thiết kế ngay từ đầu (security-by-design), đảm bảo kiểm soát truy cập, xác thực, phân quyền và mã hóa dữ liệu.

Yếu tố con người trong tòa nhà thông minh không chỉ là một đối tượng để bảo vệ, mà là một thực thể tương tác liên tục với hệ thống – tạo nên một không gian sống học hỏi và thích nghi liên tục.

1.2.5. Kết luận về mô hình hệ thống tòa nhà thông minh

Kiến trúc tòa nhà thông minh là một minh chứng rõ ràng cho sự hội tụ giữa kỹ thuật xây dựng, khoa học máy tính và khoa học hành vi. Hệ thống không chỉ vận hành dựa trên cảm biến và điều khiển, mà còn học hỏi, thích nghi và đưa ra các quyết định nhằm tối ưu hóa môi trường sống cho con người. Tuy nhiên, khả năng bị tấn công mạng cũng đồng nghĩa với việc cần tái định hình cách tiếp cận thiết kế – đảm bảo an toàn ở cả mức thiết bị, mạng, và tương tác con người. Trong tương lai, việc phát triển các kiến trúc tòa nhà thông minh cần tiếp tục đặt tính bảo mật, khả năng phục hồi và quyền riêng tư của cư dân làm trung tâm.

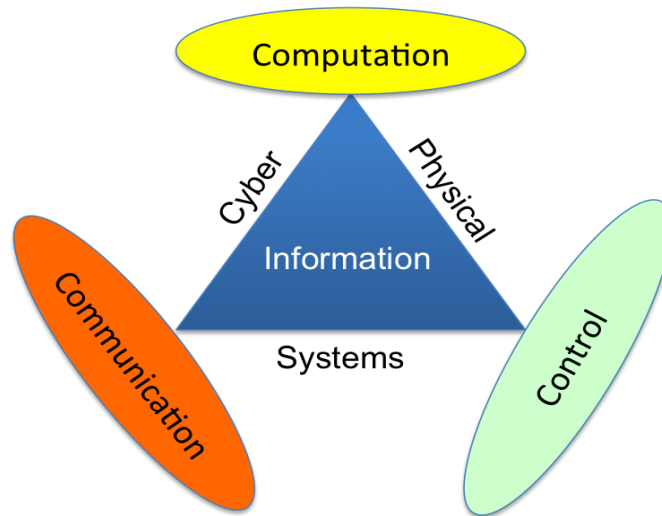
1.3. CPS/IOT VÀ ỨNG DỤNG CỦA CHÚNG TRONG THIẾT KẾ TÒA NHÀ THÔNG MINH

1.3.1. CPS (Cyber-Physical Systems)

Cyber-Physical Systems là một loại hệ thống tích hợp, kết nối các thành phần vật lý với các hệ thống máy tính để tạo ra một mạng lưới thông minh, phản hồi tức thời và hoạt động tự động. CPS sử dụng các cảm biến, thiết bị điều khiển và mạng lưới dữ liệu để kết nối với hệ thống vật lý và giám sát, kiểm soát quá trình vận hành trong thời gian thực. Các dữ liệu từ môi trường vật lý được chuyển đổi thành thông tin kỹ thuật số, giúp hệ thống hiểu rõ trạng thái hiện tại, ra quyết định và đưa ra các hành động phù hợp.

Hình xxx là mô hình CPS. Cốt lõi của nó là thông tin gắn chặt giữa các thành phần tính toán (cyber) với thành phần thiết bị vật lý (physical) trong bối

cảnh nhìn toàn diện có tính chất hệ thống dựa trên 3 trụ cột quan trọng là tính toán, điều khiển khép kín và truyền thông.



Hình xxx. Mô hình hệ thống CPS

Về bản chất, CPS là hệ thống lai giữa (hybrid), kết hợp chặt chẽ giữa thế giới liên tục (physical process) được mô tả bởi hệ phương trình vi phân / vi phân – đại số (ODE/DAE) và thế giới rời rạc (cyber layer) bao gồm điều khiển, logic, thuật toán số.

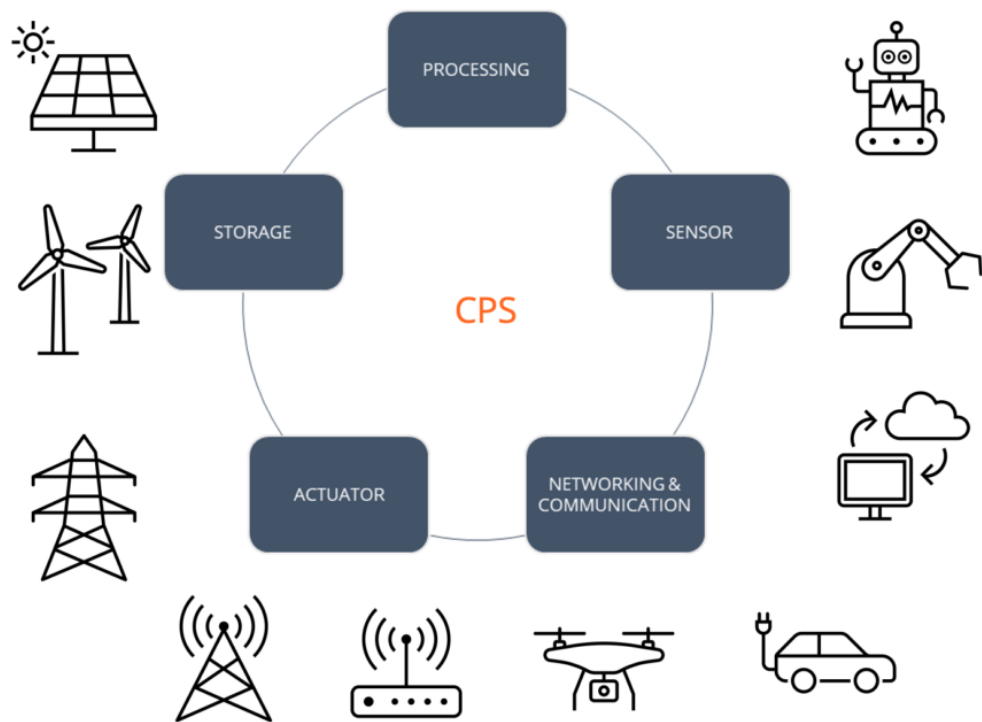
Phần Physical thường là hệ động lực liên tục (continuous dynamics), ví dụ như nhiệt độ phòng thay đổi theo phương trình vi phân nhiệt truyền, chuyển động robot tuân theo phương trình Newton hay mạch điện tuân theo phương trình vi phân Kirchhoff. Để mô phỏng điều khiển CPS, ta cần mô hình toán học lai ODE/DEA cho hệ vật lý liên tục và AUTOMATA / FSM / logic rời rạc cho phần điều khiển số.

Trong bối cảnh tòa nhà thông minh, CPS đóng vai trò cốt lõi, giúp các thành phần như hệ thống quản lý năng lượng, an ninh, và điều hòa hoạt động hiệu quả hơn. CPS không chỉ giám sát các thông số về nhiệt độ, ánh sáng mà còn giúp điều chỉnh các hệ thống này dựa trên dữ liệu thu thập được. Ví dụ, CPS có thể nhận biết khi tòa nhà không có người và tự động tắt các thiết bị không cần thiết, tiết kiệm năng lượng và giảm chi phí.

Hệ thống CPS còn mang lại khả năng bảo trì dự đoán nhờ vào các thuật toán phân tích dữ liệu lớn (Big Data), có thể phát hiện sớm các lỗi tiềm ẩn trong

thiết bị và giảm thiểu thời gian bảo trì không cần thiết. Với khả năng ra quyết định chính xác và tự động hóa, CPS giúp tòa nhà thông minh đạt được tính an toàn, bền vững và thân thiện với môi trường.

Bên cạnh các lợi ích, CPS trong tòa nhà thông minh cũng gặp thách thức như bảo mật dữ liệu và tương tác giữa các thiết bị khác nhau. Để đảm bảo hệ thống hoạt động an toàn và hiệu quả, cần có các chiến lược bảo mật chặt chẽ, cũng như sự hợp tác giữa các công nghệ tiên tiến và giao thức truyền thông.



Hình 1.2. Mô hình mối quan hệ CPS đối với mọi lĩnh vực

1.3.1.1. Cấu trúc của CPS trong hệ thống tòa nhà thông minh

- Lớp cảm nhận (Sensing layer): Tích hợp cảm biến vật lý để thu thập dữ liệu về môi trường, năng lượng, an ninh và hành vi của người dùng. Ví dụ: cảm biến khói, nhiệt độ, chuyển động, đồng hồ điện thông minh.
- Lớp kết nối (Network Layer): Đảm bảo việc truyền dữ liệu từ các cảm biến đến hệ thống xử lý trung tâm. Sử dụng hạ tầng mạng tốc độ cao (Ethernet, Wi-Fi, 5G) kết hợp với các giao thức IoT như Zigbee, LoRaWAN.

- Lớp xử lý (Data Processing Layer): Các thuật toán điều khiển số quyết định cách hệ thống phản ứng lại dữ liệu. Ví dụ: bật hệ thống phun nước chữa cháy khi phát hiện khói, tối ưu điều hòa dựa trên dự báo thời tiết.
- Lớp ứng dụng (Application Layer): Hiển thị thông tin, cung cấp dịch vụ cho người dùng và bộ phận quản lý tòa nhà. Ví dụ: bảng điều khiển năng lượng (energy dashboard), ứng dụng di động quản lý thiết bị trong căn hộ.

1.3.1.2. Ưu, nhược điểm của CPS trong hệ thống tòa nhà thông minh

- Tích hợp toàn diện giữa không gian số và vật lý
 - + CPS không chỉ thu thập dữ liệu như IoT, mà còn mô phỏng, phân tích và phản ứng theo thời gian thực.
 - + Điều này giúp tòa nhà trở thành một “hệ thống sống”, có khả năng tự học, tự điều chỉnh.
- Ra quyết định tự động và dự đoán thông minh
 - + CPS sử dụng AI và các mô hình toán học để dự đoán nhu cầu năng lượng, sự cố thiết bị hoặc hành vi của người dùng.
 - + Hỗ trợ triển khai bảo trì dự đoán (Predictive Maintenance) và điều khiển thích ứng (Adaptive Control).
- Độ tin cậy và an toàn cao hơn
 - + CPS được thiết kế với các cơ chế giám sát liên tục, điều khiển thời gian thực và khả năng khắc phục lỗi tự động.
 - + Hệ thống an ninh được tích hợp chặt chẽ, giúp phát hiện và ứng phó kịp thời với các rủi ro.
- Tối ưu hóa tài nguyên và năng lượng
 - + CPS tạo ra mô hình số (digital twin) của tòa nhà để mô phỏng việc sử dụng năng lượng, từ đó đưa ra giải pháp tối ưu.
 - + Đảm bảo giảm chi phí vận hành trong khi vẫn duy trì sự thoải mái cho cư dân.
- Khả năng mở rộng và liên kết với thành phố thông minh

- + CPS cho phép tòa nhà thông minh không chỉ hoạt động độc lập mà còn kết nối với lưới điện thông minh (Smart Grid), hệ thống giao thông, và các hạ tầng đô thị khác.
- + Đây là nền tảng quan trọng để xây dựng Smart City.

1.3.2. IOT (Internet of things)

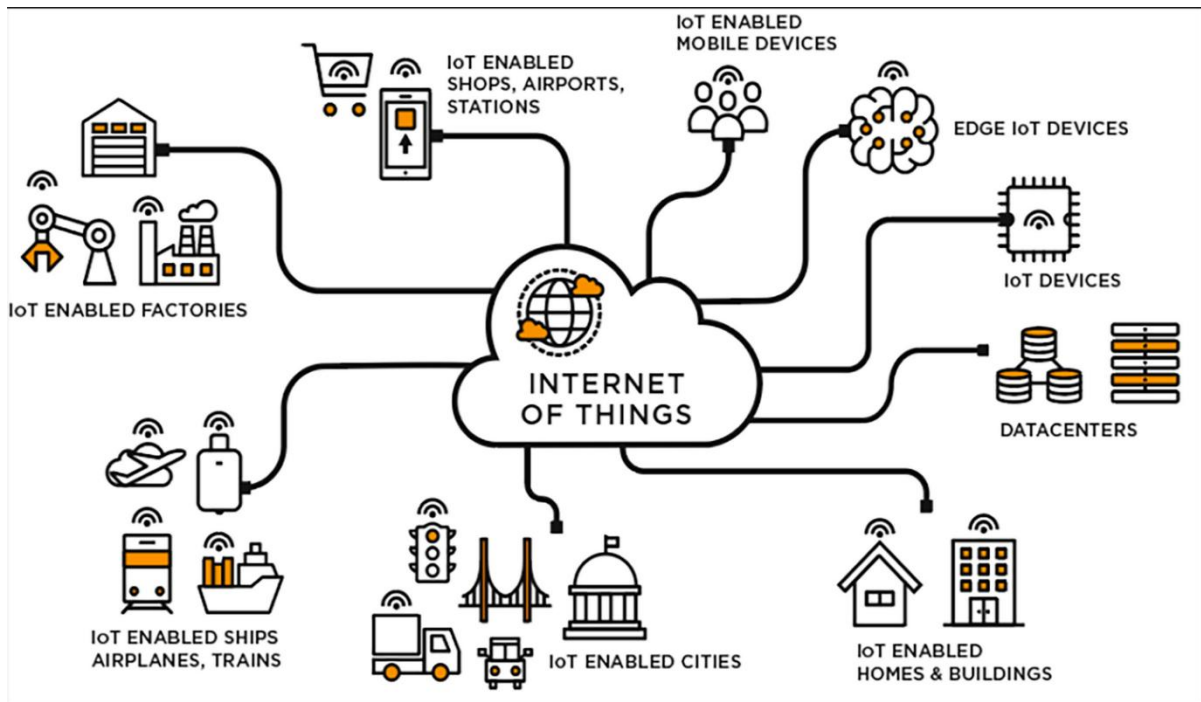
Internet of Things, hay Internet vạn vật, là một hệ thống liên kết các thiết bị và cảm biến, cho phép chúng kết nối và truyền dữ liệu qua mạng Internet. Với IoT, các thiết bị vật lý như điện thoại, máy điều hòa, tủ lạnh, đèn chiếu sáng, hệ thống an ninh, và nhiều thiết bị khác có khả năng giao tiếp, truyền dữ liệu và phản hồi lại các thay đổi trong môi trường xung quanh mà không cần sự can thiệp trực tiếp của con người. IoT hoạt động nhờ vào các cảm biến và kết nối mạng, giúp chúng không chỉ thu thập dữ liệu mà còn có khả năng phân tích, điều khiển từ xa, và phản hồi tự động.

IoT phát triển từ sự tiến bộ của công nghệ kết nối mạng, điện toán đám mây, cảm biến giá rẻ và sự gia tăng của các thiết bị thông minh trong cuộc sống hàng ngày. Các ứng dụng của IoT vô cùng rộng lớn, từ quản lý thành phố thông minh, chăm sóc sức khỏe, đến nhà thông minh và các giải pháp sản xuất trong công nghiệp. Dữ liệu từ các thiết bị IoT cho phép phân tích, dự đoán, và tạo ra các mô hình thông minh hơn trong mọi lĩnh vực.

Về bản chất, IOT là hệ thống phân tán gồm nhiều các thiết bị cảm biến, actuator, gateway,... kết nối qua mạng internet.

Về đặc trưng, các dữ liệu được thu thập từ các cảm biến khác nhau. Chúng hoạt động chủ yếu theo sự kiện rời rạc (event-driven): cảm biến gửi dữ liệu, thiết bị thực thi phản hồi. Các thiết bị nhỏ, tính toán hạn chế, thường được đẩy lên cloud/edge để xử lý và mô hình hóa chủ yếu theo hệ thống phân tán, bất đồng bộ, rời rạc.

IoT là nền tảng cốt lõi của các hệ thống tòa nhà thông minh, cho phép các thiết bị và hệ thống trong tòa nhà kết nối và giao tiếp, giúp tự động hóa, tối ưu hóa năng lượng, và tạo ra trải nghiệm tiện nghi, an toàn cho người dùng. Trong tòa nhà thông minh, IoT tạo ra mạng lưới cảm biến để thu thập thông tin từ môi trường, như nhiệt độ, ánh sáng, độ ẩm, chất lượng không khí, và sự hiện diện của con người. Thông qua mạng lưới này, IoT giúp tăng cường tính năng tự động hóa và tiết kiệm năng lượng, đồng thời cải thiện quản lý an ninh và các dịch vụ tiện ích.



Hình 1.3. Mô hình hệ thống IoT trong thành phố thông minh (Internet of Thing)

Sự phát triển nhanh chóng của Internet of Things (IoT) đã tạo ra bước tiến đột phá trong việc hình thành và triển khai các hệ thống tòa nhà thông minh (Smart Building Systems). IoT không chỉ đơn thuần cung cấp khả năng kết nối các thiết bị mà còn đóng vai trò là nền tảng hạ tầng kỹ thuật số, cho phép tòa nhà trở thành một hệ sinh thái năng động, có khả năng tự động thích ứng với nhu cầu của người sử dụng cũng như các biến động từ môi trường bên ngoài.

Về cơ bản, IoT trong tòa nhà thông minh được triển khai dựa trên ba lớp chính: lớp cảm biến và thu thập dữ liệu, lớp truyền thông và kết nối, và lớp xử lý – phân tích và ứng dụng thông minh.

1.3.2.1. Lớp cảm biến và thu thập dữ liệu (Perception Layer)

Đây là tầng nền tảng, nơi các cảm biến IoT được bố trí khắp các không gian chức năng của tòa nhà để ghi nhận trạng thái và thông số môi trường. Các cảm biến này có thể bao gồm:

- Cảm biến nhiệt độ, độ ẩm, chất lượng không khí để giám sát vi khí hậu trong tòa nhà.
- Cảm biến ánh sáng và chuyển động phục vụ điều khiển chiếu sáng tự động.
- Cảm biến năng lượng và đồng hồ thông minh để quản lý và tối ưu hóa tiêu thụ điện năng.
- Cảm biến an ninh như camera IP, cảm biến cửa, cảm biến rung để đảm bảo an toàn cho cư dân. Nhờ IoT, dữ liệu được thu thập theo thời gian thực với độ chính xác cao, tạo cơ sở cho các quyết định vận hành tức thời hoặc dự báo dài hạn.

1.3.2.2. Lớp truyền thông và kết nối (Network Layer)

Đây là tầng đảm bảo tính liên kết và trao đổi dữ liệu giữa các thiết bị IoT và hệ thống trung tâm. Các giao thức và chuẩn truyền thông phổ biến trong tòa nhà thông minh bao gồm: Wi-Fi, Zigbee, Z-Wave, LoRaWAN, Bluetooth Low Energy (BLE), hay mạng 5G trong các ứng dụng nâng cao. Đặc điểm quan trọng của lớp này là phải đảm bảo:

- Độ tin cậy cao: tránh mất mát dữ liệu.
- Độ trễ thấp: đáp ứng yêu cầu thời gian thực của các dịch vụ như kiểm soát an ninh hoặc quản lý năng lượng tức thời.
- Khả năng mở rộng: dễ dàng tích hợp thêm các thiết bị hoặc khu vực mới mà không ảnh hưởng đến hệ thống sẵn có.

1.3.2.3. *Lớp xử lý – phân tích và ứng dụng thông minh (Application Layer)*

Đây là tầng mang lại giá trị thực sự của IoT trong tòa nhà thông minh. Dữ liệu thu thập được chuyển tới hệ thống quản lý tòa nhà (Building Management System – BMS) hoặc các nền tảng điện toán đám mây để tiến hành phân tích, khai phá dữ liệu (data mining), học máy (machine learning) và trí tuệ nhân tạo (AI). Một số ứng dụng tiêu biểu bao gồm:

- Quản lý năng lượng thông minh (Smart Energy Management): dự đoán nhu cầu sử dụng điện, tối ưu điều hòa không khí (HVAC), hệ thống chiếu sáng, từ đó giảm thiểu tiêu thụ năng lượng và chi phí vận hành.
- Hệ thống an ninh và an toàn: giám sát liên tục thông qua camera IoT, cảnh báo cháy nổ hoặc xâm nhập bất hợp pháp, tự động kích hoạt hệ thống thoát hiểm.
- Quản lý tiện ích người dùng: điều khiển chiếu sáng, rèm cửa, điều hòa thông minh thông qua smartphone hoặc trợ lý ảo, cá nhân hóa trải nghiệm của cư dân.
- Bảo trì dự đoán (Predictive Maintenance): phát hiện sớm sự cố thiết bị như thang máy, máy lạnh, máy bơm nước dựa trên dữ liệu cảm biến, giúp giảm chi phí sửa chữa và nâng cao tuổi thọ thiết bị.

Một điểm nhấn quan trọng trong ứng dụng IoT vào tòa nhà thông minh là khả năng tự học và thích ứng. Thông qua dữ liệu lớn (Big Data) và phân tích hành vi người dùng, hệ thống có thể đưa ra quyết định mang tính dự đoán và thích nghi theo ngữ cảnh. Ví dụ, hệ thống chiếu sáng tự động điều chỉnh độ sáng theo thói quen sinh hoạt của từng khu vực, hoặc hệ thống điều hòa có thể học lịch trình làm việc của cư dân để bật/tắt trước khi họ đến hoặc rời khỏi tòa nhà.

Ngoài ra, việc tích hợp IoT trong tòa nhà thông minh còn đóng góp quan trọng vào phát triển bền vững. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc triển khai IoT có thể giảm 20–30% mức tiêu thụ năng lượng tổng thể, đồng thời góp phần cắt giảm lượng phát thải CO₂. Điều này phù hợp với xu hướng xanh hóa đô thị và các mục tiêu phát triển bền vững (SDGs) toàn cầu.

Tóm lại, công nghệ IoT không chỉ mang đến sự tiện nghi, an toàn và tiết kiệm chi phí mà còn định hình một hệ sinh thái tòa nhà thông minh bền vững, linh hoạt và nhân bản hơn. Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng và nhu cầu tối ưu hóa hạ tầng ngày càng cao, IoT chính là nền tảng cốt lõi giúp tòa nhà thông minh trở thành một cấu phần quan trọng của thành phố thông minh (Smart City) trong tương lai.

1.3.2.4. Ưu, nhược điểm của IOT trong hệ thống tòa nhà thông minh

Ứng dụng công nghệ IoT trong tòa nhà thông minh đem lại nhiều lợi ích nổi bật, không chỉ cải thiện hiệu quả vận hành mà còn nâng cao chất lượng cuộc sống cho cư dân. Các ưu điểm chính có thể khái quát như sau:

- Tối ưu hóa quản lý năng lượng và chi phí vận hành
 - + IoT cho phép giám sát, thu thập và phân tích dữ liệu năng lượng theo thời gian thực từ các thiết bị điện, hệ thống chiếu sáng, HVAC (heating, ventilation, and air conditioning).
 - + Nhờ khả năng tự động điều chỉnh và dự đoán nhu cầu sử dụng, hệ thống có thể giảm lãng phí, tiết kiệm từ 20–30% chi phí điện năng, góp phần nâng cao tính bền vững.
- Nâng cao mức độ an toàn và an ninh
 - + Các cảm biến IoT và camera thông minh giúp giám sát 24/7, phát hiện sớm xâm nhập bất hợp pháp, cháy nổ hoặc sự cố kỹ thuật.
 - + Hệ thống cảnh báo sớm và phản ứng tự động (ví dụ: khóa cửa, kích hoạt phun chữa cháy, mở đường thoát hiểm) đảm bảo an toàn tối đa cho cư dân.
- Cải thiện trải nghiệm và tiện ích cho người dùng
 - + Người dùng có thể điều khiển và giám sát các thiết bị (điều hòa, đèn, rèm, thiết bị gia dụng) thông qua smartphone, giọng nói hoặc giao diện điều khiển thông minh.
 - + IoT hỗ trợ cá nhân hóa không gian sống, ví dụ tự động điều chỉnh nhiệt độ, ánh sáng phù hợp với thói quen và sở thích của từng người.

- Khả năng tự động hóa và quản lý thông minh
 - + Hệ thống có thể tự động hóa nhiều tác vụ vốn cần con người thực hiện, từ bật/tắt thiết bị, điều chỉnh điện năng, đến quản lý thang máy và bãi đỗ xe.
 - + Giảm tải công việc cho nhân viên quản lý tòa nhà, nâng cao hiệu quả vận hành và giảm thiểu lỗi do con người.
- Hỗ trợ bảo trì dự đoán (Predictive Maintenance)
 - + Nhờ dữ liệu cảm biến và phân tích bằng trí tuệ nhân tạo, IoT giúp phát hiện sớm các dấu hiệu bất thường của thiết bị (thang máy, hệ thống điều hòa, máy bơm).
 - + Điều này giúp tòa nhà triển khai bảo trì dự đoán thay vì bảo trì định kỳ truyền thống, giảm chi phí sửa chữa và kéo dài tuổi thọ thiết bị.
- Tích hợp vào hệ sinh thái đô thị thông minh
 - + IoT trong tòa nhà có khả năng kết nối với các hệ thống lớn hơn của thành phố như lưới điện thông minh (smart grid), giao thông thông minh, và hệ thống quản lý hạ tầng đô thị.
 - + Điều này giúp tối ưu hóa phân phối năng lượng, nâng cao khả năng cộng tác giữa tòa nhà và môi trường đô thị, góp phần hiện thực hóa khái niệm thành phố thông minh (Smart City).
- Đóng góp vào phát triển bền vững và giảm phát thải
 - + IoT giúp tòa nhà giảm tiêu thụ năng lượng, sử dụng hiệu quả nguồn tài nguyên (nước, điện, khí đốt), đồng thời hạn chế lượng khí thải CO₂.
 - + Đây là yếu tố quan trọng trong việc đạt được các mục tiêu phát triển bền vững (Sustainable Development Goals – SDGs) và tiêu chuẩn công trình xanh (Green Building).

Mặc dù IoT mang lại nhiều lợi ích nổi bật cho hệ thống tòa nhà thông minh, song quá trình triển khai và vận hành thực tế vẫn tồn tại những hạn chế và thách

thức nhất định. Những nhược điểm này cần được nhận diện rõ ràng để có chiến lược khắc phục hiệu quả.

- Vấn đề bảo mật và quyền riêng tư dữ liệu
 - + IoT tạo ra một khối lượng lớn dữ liệu cá nhân, bao gồm thói quen sinh hoạt, lịch trình làm việc, thông tin định vị trong tòa nhà. Điều này làm gia tăng nguy cơ rò rỉ dữ liệu hoặc bị tin tặc khai thác.
 - + Các cuộc tấn công mạng như *man-in-the-middle*, *denial-of-service (DoS)* hay chiếm quyền điều khiển thiết bị IoT có thể gây ra hậu quả nghiêm trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến an ninh của cư dân và tính ổn định của tòa nhà.
 - + Việc thiếu chuẩn bảo mật đồng bộ giữa các thiết bị IoT từ nhiều nhà sản xuất khác nhau làm gia tăng tính dễ tổn thương của hệ thống.
- Độ phức tạp trong tích hợp hệ thống
 - + Các thiết bị IoT trong tòa nhà thông minh thường đến từ nhiều nhà cung cấp với chuẩn kết nối và giao thức truyền thông khác nhau (Wi-Fi, Zigbee, Z-Wave, LoRa, v.v.). Điều này dẫn đến tình trạng phân mảnh, khó đồng bộ hóa và gây tốn kém chi phí trong quá trình tích hợp.
 - + Hệ thống càng phức tạp, nguy cơ lỗi đồng bộ, xung đột giữa các thiết bị càng cao, ảnh hưởng đến tính ổn định vận hành.
- Chi phí đầu tư và vận hành cao
 - + Việc triển khai IoT trong tòa nhà thông minh đòi hỏi chi phí lớn ban đầu cho thiết bị cảm biến, hạ tầng mạng, nền tảng dữ liệu và phần mềm phân tích.
 - + Ngoài chi phí đầu tư, hệ thống còn yêu cầu chi phí bảo trì, nâng cấp và đào tạo nhân sự vận hành. Đối với nhiều tòa nhà vừa và nhỏ, đây là rào cản lớn trong việc áp dụng rộng rãi.
- Hạn chế về độ tin cậy và tuổi thọ thiết bị IoT

- + Các cảm biến IoT thường có kích thước nhỏ, sử dụng pin hoặc năng lượng thấp, dẫn đến tuổi thọ giới hạn và yêu cầu thay thế định kỳ.
- + Trong môi trường phức tạp của tòa nhà (nhiều tầng, nhiều vật cản), tín hiệu truyền thông IoT có thể bị suy giảm, gây gián đoạn kết nối hoặc mất dữ liệu.
- Phụ thuộc vào hạ tầng công nghệ
 - + Hệ thống IoT đòi hỏi sự phụ thuộc lớn vào kết nối Internet, điện toán đám mây và các nền tảng dữ liệu. Khi xảy ra sự cố mạng hoặc lỗi hệ thống trung tâm, toàn bộ chức năng thông minh của tòa nhà có thể bị tê liệt.
 - + Ngoài ra, việc nâng cấp công nghệ (ví dụ từ 4G lên 5G hoặc chuẩn IoT mới) có thể khiến các thiết bị cũ nhanh chóng lạc hậu, gây lãng phí và gia tăng chi phí thay thế.
- Các vấn đề pháp lý và chuẩn hóa
 - + Việc quản lý, lưu trữ và sử dụng dữ liệu IoT trong tòa nhà liên quan trực tiếp đến các quy định pháp luật về bảo mật thông tin và quyền riêng tư. Tuy nhiên, ở nhiều quốc gia, các khung pháp lý và chuẩn hóa IoT vẫn chưa hoàn thiện, gây khó khăn cho việc áp dụng đồng bộ.
 - + Sự thiếu hụt các tiêu chuẩn chung cho IoT trong tòa nhà thông minh làm giảm tính tương thích, hạn chế khả năng mở rộng và tích hợp với hệ sinh thái thành phố thông minh.

1.3.3. Sự kết hợp và mối quan hệ giữa CPS và IoT trong hệ thống tòa nhà thông minh

Trong kiến trúc tòa nhà thông minh, IoT và CPS không tồn tại độc lập, mà bổ trợ và tương tác chặt chẽ với nhau để tạo nên một hệ sinh thái số – vật lý hoàn chỉnh. Nếu như IoT đóng vai trò là hạ tầng cảm biến và kết nối dữ liệu, thì CPS

chính là lớp trí tuệ xử lý, phân tích và điều khiển hệ thống trong thế giới vật lý.

Mỗi quan hệ này có thể khái quát theo các khía cạnh sau:

- IoT là nền tảng dữ liệu cho CPS
 - + IoT thu thập dữ liệu từ môi trường vật lý (nhiệt độ, ánh sáng, độ ẩm, năng lượng, an ninh).
 - + CPS sử dụng dữ liệu này để mô hình hóa, phân tích, và đưa ra quyết định điều khiển.
 - + Có thể hình dung IoT là “hệ thống thần kinh ngoại vi”, còn CPS là “bộ não trung tâm” của tòa nhà thông minh.
- CPS gia tăng giá trị cho IoT thông qua trí tuệ và điều khiển
 - + IoT chỉ cung cấp kết nối và dữ liệu thô, trong khi CPS thực hiện xử lý nâng cao bằng AI, mô hình số (*digital twin*) và điều khiển thời gian thực.
 - + Ví dụ: IoT cung cấp thông tin nhiệt độ và mức tiêu thụ điện; CPS dự đoán nhu cầu, tự động điều chỉnh HVAC để tối ưu hóa năng lượng.
- Quan hệ cộng sinh: IoT mở rộng tính năng của cảm biến – CPS mở rộng tính năng của hệ quyết định.
 - + IoT càng triển khai nhiều cảm biến thì CPS càng có dữ liệu phong phú để học hỏi và tối ưu.
 - + CPS càng phát triển thì IoT càng có ý nghĩa, bởi dữ liệu thu thập không chỉ để giám sát mà còn được chuyển hóa thành hành động thông minh.

Mỗi liên hệ trong chu trình hoạt động thường diễn ra theo các bước sau:

- Cảm nhận (IoT): IoT thu thập dữ liệu từ môi trường (ví dụ: ánh sáng, nhiệt độ, an ninh).
- Truyền dẫn (IoT): Dữ liệu được gửi qua mạng đến hệ thống trung tâm.

- Xử lý & Quyết định (CPS): CPS phân tích, dự đoán và đưa ra quyết định điều khiển.
- Tác động (CPS $\rightarrow$ IoT): CPS điều khiển lại các thiết bị IoT (bật/tắt đèn, kích hoạt hệ thống an ninh, điều chỉnh điều hòa).

Quá trình này tạo thành vòng lặp khép kín (closed-loop system), đảm bảo tòa nhà hoạt động tối ưu, an toàn và bền vững.

Ví dụ thực tiễn về sự kết hợp IoT – CPS trong tòa nhà thông minh

- Quản lý năng lượng thông minh: IoT đo mức tiêu thụ điện ở từng khu vực $\rightarrow$ CPS phân tích mô hình tiêu thụ $\rightarrow$ đưa ra lệnh điều chỉnh HVAC và chiếu sáng để tiết kiệm 25–30% năng lượng.
- Hệ thống an ninh: IoT cung cấp dữ liệu từ camera, cảm biến cửa $\rightarrow$ CPS phân tích bằng nhận dạng hình ảnh và AI $\rightarrow$ cảnh báo xâm nhập bất thường, kích hoạt khóa cửa và gửi thông tin cho bảo vệ.
- Quản lý môi trường trong nhà: IoT thu thập dữ liệu không khí, ánh sáng $\rightarrow$ CPS dự đoán xu hướng chất lượng không khí và tự động điều chỉnh thông gió, ánh sáng để tối ưu sức khỏe và sự thoải mái.
- Bảo trì dự đoán: IoT ghi nhận rung động của thang máy $\rightarrow$ CPS phân tích dữ liệu bằng mô hình dự đoán $\rightarrow$ cảnh báo sớm hỏng hóc trước khi sự cố xảy ra.

1.4. THIẾT KẾ HỆ THỐNG TÒA NHÀ THÔNG MINH TRÊN CƠ SỞ CPS/IOT

1.4.1. Thiết kế kiến trúc phân tầng (Layered Architectural Design)

Một tòa nhà thông minh hiệu quả được tổ chức theo kiến trúc nhiều lớp, nhằm phân tách rõ ràng các chức năng và giới hạn phạm vi rủi ro:

- Lớp cảm biến và thiết bị đầu cuối (Perception Layer): bao gồm các cảm biến nhiệt độ, độ ẩm, chuyển động, ánh sáng, chất lượng không khí,... được cài đặt khắp các khu vực.

- Lớp truyền thông (Network Layer): đảm bảo truyền dữ liệu an toàn từ thiết bị lên các máy chủ trung tâm, sử dụng các giao thức như Zigbee, LoRa, Wi-Fi 6, hoặc mạng 5G nội bộ.
- Lớp điều phối và phân tích (Middleware & Analytics Layer): nơi dữ liệu được xử lý, học máy được ứng dụng để nhận diện hành vi, đưa ra quyết định và điều khiển hệ thống.
- Lớp ứng dụng người dùng (Application Layer): cung cấp giao diện tương tác cho cư dân, kỹ sư quản lý và hệ thống tự động hóa.

Kiến trúc phân tầng tạo điều kiện cho việc bảo trì, mở rộng, giám sát và kiểm soát truy cập theo mô hình zero-trust (tin tưởng bằng không).

1.4.2. Thiết kế kiến trúc hướng hành vi người dùng (Human-Centric Design)

Tòa nhà thông minh cần phản ánh đúng nhu cầu và hành vi của người sử dụng. Do đó, việc mô hình hóa hành vi con người được đưa vào quá trình thiết kế ngay từ đầu:

- Phân tích mẫu hành vi: thông qua dữ liệu cảm biến thu thập từ các hoạt động thường ngày như di chuyển, nhiệt độ ưa thích, ánh sáng mong muốn,...
- Thiết lập cấu hình cá nhân hóa (Personalized Profiles): mỗi cư dân có thể tương tác với hệ thống theo cách riêng, từ điều chỉnh nhiệt độ phòng đến lựa chọn hiển thị thông tin trên bảng điện tử.
- Tích hợp tương tác người-máy (HMI): các giao diện điều khiển được thiết kế tối giản, hỗ trợ điều khiển bằng giọng nói, cử chỉ hoặc ứng dụng di động.

Phương pháp này giúp tòa nhà không chỉ “thông minh” về mặt kỹ thuật, mà còn “nhạy cảm” về mặt xã hội và nhân văn.

1.4.3. Thiết kế định hướng an ninh và quyền riêng tư (Security and Privacy-by-Design)

Tấn công mạng là một trong những rủi ro lớn nhất đối với các hệ thống tòa nhà thông minh. Do đó, việc thiết kế cần tích hợp các cơ chế bảo mật ngay từ giai đoạn đầu:

- Mã hóa đầu-cuối (End-to-End Encryption) cho toàn bộ dữ liệu truyền giữa các thiết bị và máy chủ.
- Phân quyền truy cập đa cấp (Role-Based Access Control): giới hạn quyền điều khiển và truy cập dữ liệu theo vai trò cư dân, kỹ sư, bảo trì,...
- Giám sát hành vi bất thường (Anomaly Detection): sử dụng AI để phát hiện các hoạt động đáng ngờ từ thiết bị hoặc người dùng.
- Cập nhật firmware định kỳ và vá lỗi bảo mật (OTA Updates).

Ngoài ra, các dữ liệu thu thập từ người dùng cần được xử lý theo các chuẩn bảo mật như GDPR, đảm bảo rằng quyền riêng tư của cư dân không bị xâm phạm.

1.4.4. Thiết kế mô-đun hóa và khả năng mở rộng (Modular & Scalable Design)

Với sự phát triển liên tục của công nghệ và thay đổi về hành vi người dùng, tòa nhà thông minh cần có khả năng thích nghi với các thay đổi trong tương lai:

- Hệ thống mô-đun: cho phép thêm bớt các chức năng (ví dụ: bổ sung hệ thống năng lượng mặt trời, camera AI, robot dịch vụ,...) mà không làm ảnh hưởng đến các thành phần khác.
- Hỗ trợ giao thức mở và API chuẩn hóa: đảm bảo tính tương thích giữa các thiết bị khác nhau từ các nhà cung cấp khác nhau.
- Khả năng tích hợp công nghệ mới như 6G, edge AI, blockchain: giúp tòa nhà duy trì hiệu quả và an toàn trong dài hạn.

1.4.5. Thiết kế mô phỏng và kiểm chứng (Model-based Systems Engineering – MBSE)

Để kiểm tra độ tin cậy, khả năng chống tấn công và hành vi hệ thống trước khi triển khai, mô hình hóa kiến trúc tòa nhà theo hướng MBSE đang là xu hướng mạnh mẽ:

- Sử dụng SysML để mô hình hệ thống tổng thể: bao gồm yêu cầu chức năng, liên kết phần mềm – phần cứng – con người.

- Tích hợp mô phỏng hành vi (behavior simulation) và phân tích rủi ro (threat modeling).
- Kết hợp với các công cụ như OpenModelica, Papyrus hoặc Cameo Systems Modeler để mô phỏng năng lượng, dòng dữ liệu và kiểm tra kịch bản tấn công.

Phương pháp này cho phép đội ngũ thiết kế dự đoán được hành vi hệ thống trong điều kiện bất định, từ đó cải tiến thiết kế trước khi xây dựng thực tế.

1.5. CÁC CÔNG NGHỆ, CÔNG CỤ ĐỂ PHÁT TRIỂN TÒA NHÀ THÔNG MINH DỰA TRÊN CƠ SỞ CPS/IOT

Việc triển khai một hệ thống tòa nhà thông minh hiệu quả đòi hỏi sự kết hợp chặt chẽ giữa các công nghệ nền tảng, phần mềm chuyên dụng và công cụ mô hình hóa – mô phỏng – triển khai. Dưới đây là phân tích chi tiết các nhóm công nghệ chính đóng vai trò cốt lõi trong kiến trúc và vận hành của tòa nhà thông minh

1.5.1. Công nghệ cảm biến và Internet of Things

Hệ sinh thái cảm biến và thiết bị IoT là nền tảng vật lý của tòa nhà thông minh, giúp thu thập dữ liệu môi trường, phát hiện trạng thái và điều khiển thiết bị.

- Cảm biến môi trường: Nhiệt độ, độ ẩm, ánh sáng, khí CO₂, bụi mịn, tiếng ồn,...
- Cảm biến hiện diện và chuyển động: hỗ trợ điều khiển chiếu sáng, HVAC, và an ninh.
- Thiết bị điều khiển: van nước tự động, bộ điều chỉnh HVAC, khóa cửa thông minh, thang máy thông minh,...
- Chuẩn giao tiếp: Zigbee, Z-Wave, LoRaWAN, Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi 6, Ethernet, Thread.

Các thiết bị này hoạt động liên tục và tạo ra dòng dữ liệu lớn, đòi hỏi kiến trúc mạng ổn định và bảo mật cao.

1.5.2. Công nghệ truyền thông và kết nối

Hạ tầng mạng trong tòa nhà thông minh không đơn thuần là kết nối thiết bị, mà còn đảm bảo độ trễ thấp, độ tin cậy cao và khả năng bảo vệ dữ liệu.

- Mạng nội bộ tốc độ cao (LAN, VLAN) để kết nối các bộ điều khiển chính (controllers).
- Hạ tầng mạng không dây: Wi-Fi 6/6E cho vùng phủ rộng, Zigbee/Z-Wave cho thiết bị công suất thấp.
- Kết nối WAN/Internet: sử dụng mạng quang (FTTH) hoặc 5G/6G để đồng bộ với đám mây.
- Giao thức tiêu chuẩn: MQTT, CoAP, OPC-UA, BACnet/IP, KNX,... được dùng để đảm bảo tính tương thích liên thiết bị.

Tính mã hóa dữ liệu, quản lý băng thông, và chống nhiễu mạng là yếu tố trọng yếu khi triển khai trong thực tế.

1.5.3. Nền tảng phân tích dữ liệu và trí tuệ nhân tạo

Dữ liệu thu thập từ hệ thống cảm biến cần được xử lý và phân tích liên tục để ra quyết định và dự đoán trạng thái:

- Phân tích thời gian thực (Real-time Analytics): sử dụng Spark, Apache Flink, hoặc AWS IoT Analytics.
- Trí tuệ nhân tạo:
 - + Học máy (Machine Learning): nhận diện hành vi, dự đoán tiêu thụ năng lượng, phát hiện bất thường.
 - + Xử lý ngôn ngữ tự nhiên (NLP): điều khiển bằng giọng nói.
 - + Thị giác máy tính (Computer Vision): phân tích hình ảnh từ camera giám sát.
- Nền tảng AI phổ biến: TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn, Edge AI với NVIDIA Jetson, Google Coral,...

Tích hợp AI không chỉ giúp tối ưu vận hành mà còn nâng cao khả năng tự động thích nghi của tòa nhà.

1.5.4. Công nghệ điện toán đám mây và biên (Cloud & Edge Computing)

Việc xử lý dữ liệu lớn và điều phối hệ thống cần kết hợp giữa đám mây trung tâm và điện toán biên:

- Điện toán đám mây (Cloud): sử dụng AWS IoT Core, Microsoft Azure IoT Hub, Google Cloud IoT,... để lưu trữ, phân tích và quản lý từ xa.
- Điện toán biên (Edge Computing): các gateway tại tầng dưới xử lý dữ liệu tại chỗ nhằm giảm độ trễ, giảm phụ thuộc kết nối mạng.
- Kiến trúc kết hợp Cloud-Edge (Hybrid): cân bằng giữa hiệu năng, bảo mật và chi phí triển khai.

Đây là kiến trúc chủ đạo trong các tòa nhà thông minh quy mô lớn hoặc yêu cầu độ phản hồi thời gian thực cao.

1.5.5. Công nghệ an ninh mạng và bảo mật hệ thống

Với đặc thù kết nối mở và đa thiết bị, tòa nhà thông minh là mục tiêu tiềm năng cho các cuộc tấn công mạng. Các công nghệ bảo mật bao gồm:

- Xác thực đa yếu tố (MFA), Zero Trust Architecture (ZTA).
- Firewall và hệ thống phát hiện xâm nhập (IDS/IPS).
- Mã hóa dữ liệu AES-256, TLS 1.3 trong truyền thông và lưu trữ.
- Blockchain cho truy xuất nguồn gốc thiết bị và ghi log bất biến.

Ngoài ra, cần có hệ thống giám sát an ninh mạng (SIEM) để phát hiện sớm các mối đe dọa.

1.5.6. Công nghệ mô hình hóa, mô phỏng và triển khai

Để đảm bảo hệ thống hoạt động đúng như thiết kế, cần sử dụng các công cụ kỹ thuật trong các giai đoạn phân tích – thiết kế – kiểm thử.

Các công cụ này cho phép thử nghiệm các kịch bản phức tạp như mất điện, tấn công mạng, hành vi bất thường,... trước khi triển khai thực tế.

1.5.7. Giao diện người dùng và nền tảng điều khiển

Giao diện điều khiển là điểm tiếp xúc chính giữa con người và hệ thống:

- Ứng dụng di động hoặc dashboard web: cho phép điều chỉnh ánh sáng, điều hòa, khóa cửa,...
- Hệ thống điều khiển bằng giọng nói: tích hợp trợ lý ảo như Google Assistant, Alexa, hoặc AI nội bộ.
- Màn hình cảm ứng, bảng điều khiển trung tâm: hỗ trợ giám sát và điều khiển tập trung.

Tính thân thiện, trực quan, và khả năng tùy chỉnh là yếu tố then chốt trong thiết kế UI/UX cho hệ thống.

1.6. KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

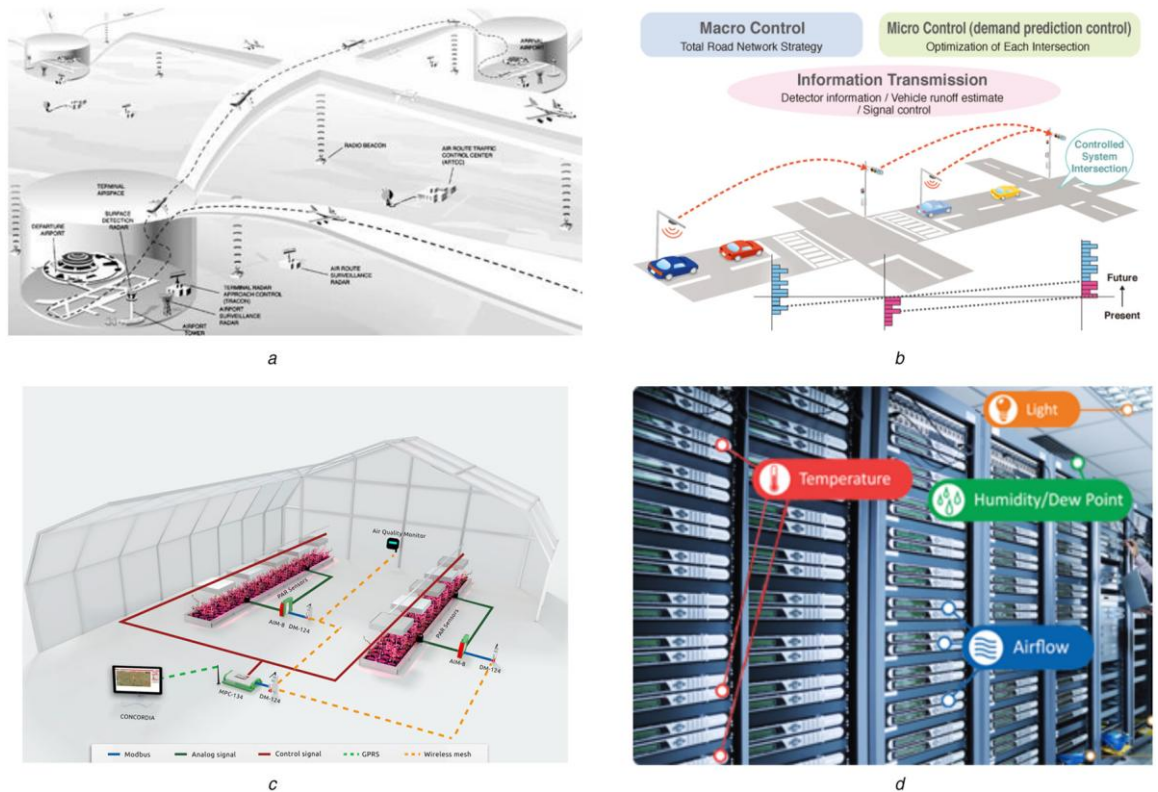
Chương này đã trình bày một cách toàn diện các khái niệm lý thuyết nền tảng liên quan đến tòa nhà thông minh dựa trên công nghệ Internet vạn vật (IoT) và Hệ thống không gian mạng–vật lý (Cyber-Physical Systems – CPS). Việc phân tích mối quan hệ tương hỗ giữa ba thành phần cốt lõi của một hệ thống tòa nhà thông minh – bao gồm tầng cảm biến, tầng mạng truyền thông, và tầng xử lý ra quyết định – cho thấy rõ ràng rằng kiến trúc IoT/CPS đóng vai trò trung tâm trong việc hiện thực hóa các chức năng tự động hóa, tối ưu hóa và thích ứng theo ngữ cảnh trong môi trường xây dựng hiện đại.

CHƯƠNG 2. GIẢI PHÁP HỆ THỐNG THÔNG TIN CHO TÒA NHÀ THÔNG MINH VỚI CPS/IOT

2.1. VẤN ĐỀ TỒN ĐONG CỦA CPS/IOT ĐỐI VỚI CÁC HỆ THỐNG QUẢN LÝ

Hệ thống mạng vật lý (CPS) nhằm vào việc tích hợp các dịch vụ điện toán và hệ thống vật lý để cung cấp các dịch vụ thông minh và mạch lạc. Trong khi đó, CPS là các hệ thống động thời gian thực phân tán và lai, với nhiều vòng lặp có mức độ quan trọng của ứng dụng khác nhau hoạt động ở các thang thời gian và không gian khác nhau. Mặc dù có nhiều nỗ lực phát triển CPS, nhiều báo cáo dự đoán rằng CPS sẽ không khả dụng cho công chúng trong vòng năm hoặc mười năm nữa. Một ví dụ nổi tiếng là xe tự hành do Tesla và các nhà sản xuất ô tô lớn trên thế giới phát triển. Có khái niệm tương tự về tích hợp máy tính và thiết bị vật lý, các ứng dụng IoT sẽ sớm có mặt trên thị trường cho công chúng. Nhiều báo cáo khảo sát thị trường bao gồm các báo cáo do CISCO và IDC công bố ước tính rằng số lượng thiết bị IoT sẽ nhiều hơn số dân trên thế giới trong một vài năm. Ngày nay, nhiều người trong chúng ta có thể cần quản lý ba đến bảy thiết bị kỹ thuật số và tổng số thiết bị được kết nối với mạng sẽ tăng lên 50 tỷ vào năm 2020. Trong số 50 tỷ thiết bị, một số lượng lớn các thiết bị sẽ được lắp đặt trong các nhà máy và tòa nhà thương mại/dân cư, trên xe cộ và trên đường phố. Do đó, làm thế nào để quản lý các thiết bị này để đảm bảo rằng hầu hết, nếu không muốn nói là tất cả, chúng hoạt động chính xác để thực hiện các dịch vụ đã triển khai là một thách thức cơ bản đối với các ứng dụng IoT. Đặc biệt, hầu hết người dùng các thiết bị này không được đào tạo và không muốn được đào tạo để cấu hình thủ công các dịch vụ trên các thiết bị này. Các dịch vụ IoT nên được quản lý với ít nỗ lực của người dùng nhất. Không mất tính tổng quát, chúng tôi giới thiệu CPS/IoT cho cả hệ thống CPS và IoT trong đề xuất này mặc dù có sự khác biệt đáng kể giữa các kiến trúc hệ thống của chúng. Mục tiêu của bài đề án này là nghiên cứu

những thách thức mới, các nghiên cứu đang diễn ra và các vấn đề chưa được giải quyết.



Hình 2.1. Ví dụ về những nhiệm vụ nan giải nhưng không kém phần quan trọng CPS/IOT trong hệ thống tòa nhà thông minh và thành phố thông minh. a) ATCS, b) Hệ thống điều khiển giao thông thông minh, c) Nhà xanh thông minh, d) Hệ thống quản lý nhiệt độ trong phòng server

Hình 2.1 cho thấy bốn ví dụ về hệ thống CPS/IoT đang gặp phải những thách thức mới. Cả bốn ví dụ này đều là nhiệm vụ quan trọng, trong đó hệ thống không thể khôi phục sau khi trạng thái hệ thống đã thay đổi

Hình 2.1a và b cho thấy hai hệ thống kiểm soát giao thông, một là hệ thống kiểm soát không lưu (ATCS) và hệ thống còn lại là hệ thống kiểm soát giao thông thông minh. ATCS có vai trò quan trọng đối với nhiệm vụ theo nghĩa nếu quyết định bị trì hoãn hoặc sai, thì không thể đảo ngược và khôi phục lại được thay đổi đối với hệ thống. Một quyết định sai có thể gây ra va chạm giữa các máy bay hoặc làm chậm lịch trình. Vào ngày 12 tháng 12 năm 2014, một trục trặc trên ATCS, bắt đầu hoạt động vào năm 2012, đã khiến 1300 chuyến bay bị hủy và nhiều chuyến bay khác bị chậm tại Sân bay Heathrow. Hơn nữa, hiệu ứng dây chuyền

đã gây ra nhiều sự chậm trễ hơn ở các sân bay lân cận. Không có báo cáo nào về sự gián đoạn tại thời điểm viết bài này. Trong ví dụ này, hành khách là các hệ thống vật lý. Lịch trình di chuyển của họ bị thay đổi và không thể khôi phục hoàn toàn. Các máy bay được ATCS chỉ huy và luôn chờ lệnh để tiếp tục. Trong khi các máy bay trong hệ thống có thể bị hạ cánh và chờ các mối quan ngại về an toàn, thì lịch trình di chuyển của từng cá nhân thì không. Hệ thống kiểm soát giao thông xe thông minh điều khiển đèn giao thông bằng cách sử dụng dữ liệu giao thông thu thập được trên đường. Trong các hệ thống như vậy, đèn giao thông vẫn không thay đổi khi không có lệnh mới và là một phần của hệ thống máy tính. Mặt khác, xe cộ trên đường được điều khiển bởi người lái xe và là hệ thống vật lý. Một lệnh sai cho đèn giao thông có thể gây ra va chạm tại các ngã tư hoặc làm chậm lịch trình của người lái xe. Do đó, cả ATCS và hệ thống kiểm soát giao thông xe thông minh đều là CPS/IoT quan trọng đối với nhiệm vụ.

Hình 2.1c và d cho thấy hai hệ thống kiểm soát thời tiết, duy trì nhiệt độ trong một phạm vi nhất định. Cụ thể, nhiệt độ trong Nhà kính thông minh được thể hiện trong Hình 1c đã được kiểm soát trong phạm vi vài độ và nhiệt độ trong Phòng máy chủ được thể hiện trong Hình 2.1d được giới hạn ở mức 27°C hoặc 80°F. Một quyết định sai, do nhiệt độ đọc không chính xác, trong Nhà kính thông minh có thể gây hại cho cây trồng trong nhà kính, chẳng hạn như hoa lan, và thiệt hại cho cây trồng thường không thể phục hồi; tương tự như vậy, một quyết định sai trong Phòng máy chủ có thể tắt máy chủ, dẫn đến tổn thất tài chính cho trung tâm dữ liệu như yêu cầu bồi thường từ khách hàng.

2.2. CÁC THÁCH THỨC VÀ GIẢI PHÁP TRONG PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG CPS/IOT

2.2.1. Phần mềm trung gian (middleware) cho phát triển và quản lý dịch vụ

Phần mềm trung gian (middleware) dùng để nối các dịch vụ lại với nhau để thực hiện các chức năng kết hợp. Vì vậy, hệ điều hành là phần mềm trung gian và môi trường thời gian chạy trên các hệ thống tính toán cũng là phần mềm trung

gian. Trong bài viết này, phần mềm trung gian cho CPS/IoT đại diện cho môi trường để phát triển, triển khai, thực thi và quản lý các dịch vụ cho CPS/IoT.

2.2.1.1. Phần mềm trung gian CPS/IoT

Nhiều chuyên gia đã đề xuất một middleware thời gian thực có thể cấu hình lại dành cho CPS phân tán với các sự kiện không định kỳ vào năm 2008. Nghiên cứu này tập trung vào các quy trình làm việc linh hoạt trong CPS. Các CPS phân tán khác nhau phải xử lý các sự kiện định kỳ và không định kỳ với các yêu cầu đa dạng. Trong khi các middleware thời gian thực hiện có, chẳng hạn như real-time CORBA, đã cho thấy tiềm năng như một nền tảng cho các hệ thống phân tán với các ràng buộc về thời gian, chúng thiếu các cơ chế cấu hình linh hoạt cần thiết để dễ dàng quản lý thời gian từ đầu đến cuối cho nhiều loại CPS khác nhau với cả các sự kiện định kỳ và không định kỳ. Đóng góp chính của nghiên cứu này là thiết kế, triển khai và đánh giá hiệu suất của các dịch vụ middleware thành phần có thể cấu hình đầu tiên dành cho kiểm soát chấp nhận và cân bằng tải trong việc xử lý các sự kiện định kỳ và không định kỳ trong CPS phân tán. Kết quả thực nghiệm chứng minh sự cần thiết và hiệu quả của phương pháp middleware thành phần có thể cấu hình của chúng tôi trong việc hỗ trợ các ứng dụng khác nhau với các sự kiện định kỳ và không định kỳ, đồng thời cung cấp một nền tảng phần mềm linh hoạt cho CPS phân tán với các ràng buộc thời gian từ đầu đến cuối.

WuKong là một middleware thông minh giữa các ứng dụng và các thiết bị IoT. Nó hỗ trợ các tính năng sau: Đầu tiên, nhận diện các thiết bị không đồng nhất trong kết nối, ngữ cảnh người dùng và nhu cầu. Thứ hai, cấu hình và chuyển đổi các thiết bị thành các thành phần dịch vụ. Thứ ba, thích nghi và phân phối mã ứng dụng để đạt được kết quả mong muốn. Cuối cùng, thực hiện tất cả những điều trên thông qua truy cập từ xa đến các cảm biến. Một mục tiêu khác là sử dụng middleware WuKong như nền tảng phát triển ứng dụng IoT thế hệ tiếp theo để xây dựng các ứng dụng cấp cao. Middleware WuKong bao gồm một JVM nhẹ. JVM cho phép các nhà phát triển thêm hành vi cụ thể của ứng dụng vào các chức năng đã có trong phần cứng cảm biến/bộ điều khiển.

Middleware WuKong bao gồm hai thành phần chính để giải quyết khoảng cách trong phát triển và quản lý ứng dụng IoT: middleware thông minh và khung phát triển dựa trên luồng. Middleware WuKong được coi là một middleware ảo (VMW). Có hai lý do cho điều này. Thứ nhất, khi mạng cảm biến trở nên phổ biến rộng rãi, rất có khả năng các ứng dụng phải sử dụng cảm biến được phát triển bởi các nhà sản xuất khác nhau và giao tiếp bằng các giao thức mạng khác nhau. Có một cảm biến ảo sẽ cho phép các ứng dụng chạy trên mạng cảm biến không đồng nhất. Thứ hai, khi hệ thống quyết định cấu hình lại mạng, quá trình lập trình lại các nút sẽ ít tốn kém hơn nhờ thiết kế máy ảo, vì số dòng mã sẽ giảm đi do cảm biến ảo có thể cung cấp các nguyên thủy cấp cao dành riêng cho các ứng dụng IoT. Trên nền middleware WuKong, khung WuKong có thể trì hoãn việc liên kết các thành phần logic với các thiết bị vật lý cho đến khi ứng dụng được triển khai, thay vì khi ứng dụng được phát triển. Với middleware thông minh và FBP, khung WuKong cho phép liên kết thông minh cho các hệ thống IoT.

2.2.1.2. Thách thức về thiết kế middleware cho tòa nhà thông minh

Middleware được trình bày ở trên cung cấp môi trường phát triển và vận hành cho nhiều ứng dụng IoT. Tuy nhiên, vẫn còn nhiều thách thức cần giải quyết:

- Kiểm soát quyền riêng tư: IoT trong các tòa nhà thông minh và thành phố thông minh thu thập hành vi của người dùng, có hoặc không có danh tính. Việc dữ liệu được thu thập thuộc quyền sở hữu, công bố, lưu trữ và sử dụng như thế nào là mối quan tâm quan trọng đối với cư dân trong các tòa nhà và thành phố. Middleware cần cung cấp cơ chế để bảo vệ quyền riêng tư và kiểm soát luồng dữ liệu nhằm đáp ứng các yêu cầu quyền riêng tư do nhà phát triển hoặc người dùng đặt ra. Chính sách kiểm soát quyền riêng tư được định nghĩa trong middleware cần được áp dụng trên các hệ thống CPS/IoT. Tuy nhiên, hiện nay thiếu một dạng biểu diễn có thể đọc được bằng máy để kiểm soát quyền riêng tư, và điều này cần được định nghĩa để tất cả các thiết bị tham gia trong hệ thống đều tuân theo.

- Kiểm soát truy cập: So với kiểm soát quyền riêng tư, chính sách kiểm soát truy cập định nghĩa quyền được phép truy cập dữ liệu cho các dịch vụ hoặc thiết bị. Dữ liệu được thu thập trong các tòa nhà và thành phố thông minh thường chứa thông tin về vị trí và thời gian. Do đó, kiểm soát truy cập không chỉ cần xem xét các dịch vụ thu thập dữ liệu, mà còn cả các thuộc tính khác như vị trí và thời gian để xác thực quyền truy cập vào dữ liệu.
- Khả năng mở rộng: Trong các tòa nhà và thành phố, số lượng thiết bị và dịch vụ triển khai có thể lên đến hàng nghìn hoặc hàng trăm nghìn. Không khả thi để thiết kế một dịch vụ duy nhất với các liên kết giao tiếp phức tạp giữa các thành phần dịch vụ và kết nối mạng phức tạp giữa các thiết bị ở quy mô này. Do đó, trên middleware, cần thiết kế một dịch vụ duy nhất cho các thiết bị cùng loại và triển khai dịch vụ này cho tất cả các thiết bị trong tòa nhà và thành phố. Các liên kết giữa các dịch vụ cần được middleware kết nối tự động theo các quy tắc khác nhau. Ví dụ, một đầu báo khói thông minh có thể cung cấp hướng sơ tán chính xác dựa trên dữ liệu được thu thập từ các đầu báo khói khác trong cùng một tòa nhà. Các liên kết luồng dữ liệu giữa các đầu báo khói phụ thuộc tự nhiên vào vị trí. Do đó, middleware có thể tự động liên kết các thiết bị được triển khai gần nhau để trao đổi dữ liệu thu thập.
- Quản lý dịch vụ: Quản lý các dịch vụ trên hàng nghìn hoặc hàng trăm nghìn thiết bị trong một hệ thống là một công việc đầy thách thức. Thêm vào đó, các thiết bị có khả năng không đồng nhất, nhưng vẫn thực hiện cùng một dịch vụ hoặc dịch vụ tương tự. Nhiều công cụ quản lý dịch vụ hiện nay được thiết kế để quản lý các hệ thống máy tính với đầy đủ khả năng, bao gồm giao thức mạng để hỗ trợ quản lý từ xa và hệ thống lưu trữ để ghi lại các thao tác và sự kiện trên các thiết bị được quản lý. Trong các hệ thống CPS/IoT, không phải tất cả thiết bị đều có các khả năng trên. Một số thiết bị chỉ có khả năng giao tiếp hạn chế; một số chỉ có thể truy cập vào các khoảng thời gian nhất định do giới hạn năng lượng. Middleware CPS/IoT

dành cho tòa nhà và thành phố thông minh cần có khả năng giám sát từ xa và quản lý các dịch vụ triển khai trên thiết bị. Khi có lỗi, dù là phần cứng hay phần mềm, các dịch vụ bị lỗi cần được xác định và thay thế trong thời gian ngắn nhất. Khi cấu hình hoặc yêu cầu thay đổi, các dịch vụ cần được cấu hình lại hoặc thay thế với chi phí quản lý tối thiểu.

2.2.2. Chất lượng dữ liệu

Chất lượng dữ liệu là thách thức thứ hai đối với các dịch vụ tính toán trong CPS/IoT, đặc biệt trong các tòa nhà thông minh và thành phố thông minh. Hệ thống CPS/IoT tích hợp hai loại hệ thống với các giả định khác biệt về hành vi của hệ thống. Một khác biệt lớn là vòng đời của dữ liệu. Dữ liệu trong hệ thống tính toán tồn tại cho đến khi bị cập nhật hoặc xóa; trong khi dữ liệu trong hệ thống vật lý chỉ hợp lệ tại thời điểm cảm biến và sẽ không được lưu trữ trừ khi có chỉ định. Nếu không có sự biểu diễn phù hợp về chất lượng dữ liệu như độ chính xác, vòng đời, vị trí và thời gian mẫu, quá trình tính toán rất có thể sẽ diễn giải sai hoặc sử dụng sai dữ liệu từ các quy trình vật lý. Do đó, CPS/IoT cần đảm bảo dữ liệu thu thập đáp ứng các yêu cầu được chỉ định bởi các quy trình tính toán.

2.2.3. Thành phần dịch vụ và mô hình tính toán

Mục tiêu của việc triển khai các thiết bị cảm biến trong các tòa nhà và thành phố là thu thập dữ liệu và phản hồi một cách thụ động, chủ động hoặc thậm chí là chủ động trước. Quyết định cơ bản là cách xử lý dữ liệu đã thu thập: mô hình tập trung hoặc phân tán, xử lý trên thiết bị biên hay thiết bị đám mây. Ví dụ, SmartThings sử dụng mô hình tập trung và dựa trên đám mây. Tuy nhiên, mô hình này có một số nhược điểm lớn như hạn chế về khả năng mở rộng và khả năng phản hồi. Một cách tiếp cận khác là sử dụng mô hình tính toán phân tán, trong đó các dịch vụ có thể được thực hiện trên các thiết bị trong hệ thống mà không cần kết nối Internet

2.2.4. Khả năng chịu lỗi

Khả năng chịu lỗi là thách thức thứ tư đối với các ứng dụng IoT được triển khai trong thực tế, vì sự cố của một thiết bị IoT có thể làm gián đoạn hoặc thậm chí đe dọa đến tính mạng người dùng. IoT/CPS mang tính dị thể cao và luôn tiến hóa, làm gia tăng các thách thức về quản lý. Cần có cơ chế giám sát lỗi hiệu quả để giảm thiểu lưu lượng giám sát tổng thể, trong khi vẫn đảm bảo độ tin cậy.

2.2.5. Sự ổn định của mạng internet

Trong hệ thống tòa nhà thông minh, sự ổn định và nhanh nhạy của mạng internet là điều tất yếu, vì thế mạng Zigbee luôn là sự lựa chọn tối ưu trong hệ thống sử dụng công nghệ CPS/IoT.

Mạng Zigbee là một công nghệ không dây đã được ra đời cách đây hơn một thập kỷ. Nó được xây dựng dựa trên tiêu chuẩn 802.15.4 của IEEE. Là một giải pháp thay thế cho mạng wifi và bluetooth trên một số ứng dụng. Trong đó sẽ bao gồm các thiết bị sử dụng ít năng lượng.

Công nghệ Zigbee không có tập trung vào các điểm kết nối quá nhiều. Zigbee sẽ hoạt động tốt khi truyền dữ liệu giữa hai thiết bị có công suất cao khác nhau trong phạm vi ngắn. Trong thực tế, nếu dùng quá nhiều các thiết bị sử dụng mạng Zigbee trong hệ thống tòa nhà thông minh, vẫn sẽ có thể xảy ra trường hợp một số thiết bị không thể kết nối. Bởi vì có quá nhiều thiết bị muốn kết nối để tương tác với bộ điều khiển trung tâm.

Công nghệ Zigbee có các nút hoạt động như một mạng lưới. Ngay cả khi có nút nào đó phát hiện tín hiệu bị lỗi, các thiết bị vẫn được hoạt động một cách ổn định. Để đánh giá cụ thể hơn về tầm quan trọng của mạng Zigbee, chúng ta sẽ đi qua từng yếu tố sau đây:

- Tính bảo mật cao: Để đánh giá về vấn đề bảo mật của mạng Zigbee, loại mạng này được bảo mật với các khóa đối xứng 128 bit. Cách mã hóa này đạt tiêu chuẩn cao được sử dụng trong các ứng dụng trực tuyến của ngân hàng hay cả trong các cơ quan chính phủ. Chính vì thế khi sử dụng Zigbee

sẽ làm tăng khả năng bảo mật. Người dùng cũng yên tâm hơn khi sử dụng hệ thống nhà smartphone có kết nối Zigbee.

- Mạng lưới kết nối rộng lớn: Như đã nói ở trên Zigbee sở hữu lên đến 65.000 điểm nút giúp nó trở thành một mạng lưới kết nối lớn hoạt động một cách hiệu quả và ổn định. Trong đó, mỗi điểm nút đều có vai trò truyền tải thông tin độc lập, chúng tự kết nối và truyền tải dữ liệu với nhau mà không cần kết nối một cách liên tục với bộ điều khiển trung tâm. Nếu có một nút bị lỗi thì nút điều khiển sẽ tự động kết nối để đảm bảo mạng lưới có thể hoạt động một cách hiệu quả.
- Sử dụng năng lượng hiệu quả: Khi có nhiều thiết bị kết nối trong ngôi nhà thông minh, việc tiêu tốn điện năng khiến nhiều người lo ngại. Zigbee sẽ giúp người dùng sử dụng nguồn điện một cách hiệu quả, không những thế nó còn giúp người dùng kiểm soát tốt mọi hoạt động của các thiết bị nhờ khả năng hẹn lịch cho các thiết bị hoạt động. Do đó, điện năng tiêu tốn cho các thiết bị chuẩn Zigbee thường rất tiết kiệm.

Ưu nhược điểm của ZigBee

Hiện nay, mạng Zigbee được dùng rộng rãi trong nhà thông minh bởi nó có những ưu điểm vượt trội như:

- Lắp đặt đơn giản: Việc lắp đặt các thiết bị có sử dụng mạng Zigbee rất đơn giản và dễ dàng.
- Kết nối internet: Thông qua kết nối internet người dùng dễ dàng điều khiển các thiết bị. Nhờ đó việc điều khiển trong ngôi nhà thông minh của người dùng cũng dễ dàng hơn.
- Khả năng mở rộng cao: Mạng Zigbee không cần nhiều cục phát trung tâm bởi vì, các thiết bị sử dụng mạng này vừa có thể nhận vừa có thể truyền dữ liệu cho các thiết bị khác. Nhờ vậy mà nó sẽ trở thành một mạng lưới mở rộng cực lớn. Zigbee có thể mở rộng lên đến 65.000 thiết bị trong cùng hệ thống.
- Zigbee được sử dụng mã hóa AES-128, nhờ đó mà nó có độ bảo mật cao.

- Hoạt động ổn định: Đây là công nghệ mạng hoạt động ổn định trong phạm vi có mật độ tín hiệu dày đặc.

Ngoài những ưu điểm trên thì Zigbee có một số nhược điểm như:

- Trong một phạm vi có diện tích quá rộng thì mạng Zigbee không thể phủ sóng hết toàn bộ. Lúc này sẽ cần một thiết bị giúp mở rộng độ phủ sóng là ZigBee Repeater.
- Mạng Zigbee sẽ bị yếu đi khi gặp vật cản lớn hoặc nhà có nhiều phòng. Đặc biệt nó không thể xuyên tường được.
- Độ ổn định của sóng Zigbee không ổn định bằng thiết bị đi dây.

Mỗi mạng cảm biến không dây dựa trên ZigBee đều có một Bộ điều phối ZigBee (ZC). Trong mỗi mạng, chỉ có duy nhất một bộ điều phối, và ZC là thiết bị chịu trách nhiệm thiết lập mạng. ZC lưu trữ thông tin mạng bao gồm các khóa bảo mật (chẳng hạn như số nhận dạng mạng khu vực cá nhân - PAN ID). Bộ điều phối này là mô-đun RF thu phát không chỉ nhận dữ liệu từ các nút cảm biến tương ứng thuộc về nó mà còn đảm nhiệm việc cấu hình từ xa và phát hiện lỗi của các nút cảm biến liên quan khác trong mạng.

Trong các cấu trúc liên kết dạng cây và dạng lưới, các bộ định tuyến ZigBee (ZRs) được sử dụng để mở rộng phạm vi phủ sóng của mạng cho giao tiếp không dây. Ngoài ZC và ZRs, còn có hai loại thiết bị ZigBee khác. Thiết bị ZigBee có thể được cấu hình (lập trình) thành thiết bị đầu cuối ZigBee (ZED) và thiết bị đầu cuối ZigBee kiêm bộ định tuyến (ZEDR). ZED thường là các thiết bị có công suất thấp và chạy bằng pin nhỏ. Chúng truyền dữ liệu trực tiếp đến nút cha (ZC), và nút cha có thể là bộ điều phối hoặc một nút định tuyến khác. ZED không thể chuyển tiếp dữ liệu từ các nút khác. Các ZRs chuyển tiếp gói tin của các nút lân cận đến đường dẫn được chỉ định, trong khi nút ZEDR có thể chuyển tiếp cả dữ liệu của chính nó lẫn dữ liệu của các nút lân cận trong mạng. Các nút ZR và ZEDR đều có tùy chọn công suất giống như ZED.

Các nút ZigBee được phân bố ở những khoảng cách khác nhau trong khu vực đô thị của môi trường gia đình, và dữ liệu được gửi qua mạng đến bộ điều phối.

2.3. TỔNG THỂ KIẾN TRÚC HỆ THỐNG

2.3.1. Tầng Thiết bị (Device Layer)

Tầng thiết bị bao gồm các cảm biến và thiết bị IoT được lắp đặt trong tòa nhà, có khả năng giám sát các yếu tố vật lý như nhiệt độ, ánh sáng, độ ẩm, sự hiện diện của con người, và chất lượng không khí. Các thiết bị này thu thập dữ liệu và gửi đến các bộ xử lý thông qua mạng truyền thông. Một số thiết bị phổ biến là cảm biến chuyển động, cảm biến ánh sáng, camera an ninh, khóa cửa thông minh, và các hệ thống HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) thông minh.

2.3.2. Tầng Truyền thông (Communication Layer)

Dữ liệu từ tầng thiết bị được truyền tải qua tầng truyền thông, đóng vai trò kết nối các thiết bị IoT với hệ thống trung tâm. Tầng này sử dụng các giao thức truyền thông như Wi-Fi, Zigbee, Z-Wave, Bluetooth, và LPWAN để truyền dữ liệu. Tầng truyền thông giúp duy trì kết nối liên tục và bảo mật dữ liệu giữa các thiết bị với hệ thống trung tâm, cho phép giám sát và kiểm soát tòa nhà từ xa.

2.3.3. Tầng Xử lý Dữ liệu (Data Processing Layer)

Tầng xử lý dữ liệu là trung tâm của kiến trúc hệ thống, nơi dữ liệu được thu thập từ các cảm biến và thiết bị được xử lý và phân tích. Hệ thống có thể lưu trữ dữ liệu trên nền tảng đám mây hoặc tại các máy chủ nội bộ, tùy thuộc vào yêu cầu bảo mật và khả năng mở rộng của tòa nhà. Công nghệ trí tuệ nhân tạo (AI) và dữ liệu lớn (Big Data) được áp dụng để phân tích dữ liệu thời gian thực, giúp phát hiện các xu hướng, cảnh báo các sự cố, và dự đoán nhu cầu của tòa nhà.

2.3.4. Tầng Ứng dụng (Application Layer)

Tầng ứng dụng cung cấp các tính năng và dịch vụ trực tiếp cho người dùng, quản lý, và bảo trì tòa nhà. Các ứng dụng bao gồm quản lý năng lượng, bảo mật,

bảo trì dự đoán, hệ thống kiểm soát môi trường, và trải nghiệm người dùng tùy biến. Thông qua ứng dụng di động hoặc giao diện web, người quản lý có thể theo dõi, điều chỉnh và nhận các thông báo về tình trạng hoạt động của tòa nhà. Người dùng cũng có thể tùy chỉnh môi trường sống theo ý thích, như điều chỉnh ánh sáng và nhiệt độ, từ thiết bị di động hoặc các thiết bị điều khiển thông minh.

2.4. MỘT SỐ THÀNH PHẦN CHÍNH CỦA HỆ THỐNG IOT/CPS TRONG TÒA NHÀ THÔNG MINH

Thiết bị IoT và Cảm biến: Các cảm biến như cảm biến chuyển động, ánh sáng, nhiệt độ, độ ẩm, và chất lượng không khí là thành phần thiết yếu để thu thập dữ liệu môi trường. Các thiết bị như khóa cửa thông minh, camera giám sát và hệ thống HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) cũng thuộc nhóm này.

Bộ truyền tín hiệu và Giao thức Kết nối: Tầng truyền thông kết nối các thiết bị với hệ thống trung tâm thông qua các giao thức như Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth và LPWAN, cho phép truyền tải dữ liệu một cách liên tục và bảo mật.

Hệ thống Điều khiển và Xử lý Dữ liệu: Bộ xử lý trung tâm (có thể là máy chủ cục bộ hoặc đám mây) tiếp nhận dữ liệu, xử lý, phân tích và ra quyết định. AI và Big Data cũng được tích hợp tại đây để cung cấp tính năng phân tích nâng cao và dự đoán.

Ứng dụng và Giao diện Người dùng: Cung cấp các dịch vụ quản lý và điều khiển như theo dõi năng lượng, an ninh, bảo trì và tối ưu hóa môi trường. Người dùng có thể quản lý và tùy chỉnh từ xa qua ứng dụng di động hoặc giao diện web, tạo trải nghiệm thông minh, tiện lợi và an toàn hơn.

Hệ thống Bảo mật và Quản lý Dữ liệu: Đảm bảo bảo mật thông tin và bảo vệ quyền riêng tư của người dùng. Thành phần này bao gồm mã hóa, quản lý truy cập và bảo mật mạng để giảm thiểu các nguy cơ xâm nhập, giúp tòa nhà an toàn và đáng tin cậy.

2.5. QUY TRÌNH TỰ ĐỘNG HÓA TRONG TÒA NHÀ HỆ THỐNG THÔNG MINH

Quy trình tự động hóa trong tòa nhà thông minh là sự phối hợp giữa các thiết bị, cảm biến, hệ thống điều khiển và phần mềm quản lý nhằm tối ưu hóa các hoạt động vận hành, giảm tiêu thụ năng lượng, và nâng cao trải nghiệm của người sử dụng. Hệ thống tự động hóa trong tòa nhà thông minh thường bao gồm các bước sau:

1. Thu thập dữ liệu từ cảm biến

- Các cảm biến IoT được lắp đặt khắp tòa nhà để thu thập dữ liệu thời gian thực.
 - + Cảm biến ánh sáng đo độ sáng của môi trường.
 - + Cảm biến chuyển động phát hiện sự hiện diện của con người.
 - + Cảm biến nhiệt độ và độ ẩm theo dõi môi trường khí hậu trong tòa nhà.
 - + Cảm biến chất lượng không khí đo nồng độ CO₂, PM2.5, và các chất gây ô nhiễm khác.

Dữ liệu này là cơ sở để hệ thống đưa ra các quyết định tự động.

2. Truyền dữ liệu qua mạng truyền thông

- Các dữ liệu thu thập được từ cảm biến được truyền đến trung tâm xử lý qua các giao thức mạng như Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth, hoặc LoRaWAN.
- Tầng truyền thông đảm bảo rằng dữ liệu được truyền đi nhanh chóng, ổn định và bảo mật.

3. Xử lý và phân tích dữ liệu

- Dữ liệu được xử lý tại máy chủ nội bộ hoặc trên các nền tảng đám mây.
- Các thuật toán trí tuệ nhân tạo (AI) và dữ liệu lớn (Big Data) được sử dụng để phân tích:
 - + Nhận diện mẫu hành vi: Hệ thống phân tích thói quen sử dụng của người dân trong tòa nhà.

- + Phát hiện bất thường: Cảnh báo các sự cố như nhiệt độ quá cao, có sự xâm nhập bất hợp pháp, hoặc hệ thống không hoạt động đúng.

4. Đưa ra quyết định tự động

Dựa trên kết quả phân tích, hệ thống đưa ra các quyết định điều chỉnh:

- Tối ưu hóa năng lượng:
 - + Tắt đèn hoặc giảm mức độ chiếu sáng ở khu vực không có người.
 - + Điều chỉnh nhiệt độ máy điều hòa dựa trên số lượng người trong phòng.
- Quản lý an ninh:
 - + Khóa tự động các cửa ở khu vực không được phép truy cập.
 - + Kích hoạt cảnh báo khi phát hiện xâm nhập trái phép.
- Cải thiện tiện nghi:
 - + Điều chỉnh ánh sáng và nhiệt độ theo thói quen của người dùng

5. Phản hồi và giám sát thời gian thực

- Kết quả của các hành động tự động được giám sát liên tục thông qua giao diện điều khiển, ứng dụng di động, hoặc màn hình trung tâm.
- Người dùng hoặc quản trị viên có thể can thiệp bằng tay nếu cần thiết, ví dụ như thay đổi nhiệt độ, bật/tắt các thiết bị.

6. Cập nhật và bảo trì hệ thống

- Các hệ thống tự động hóa trong tòa nhà thường xuyên được kiểm tra và cập nhật để đảm bảo hiệu quả và an toàn.
- Công nghệ bảo trì dự đoán giúp phát hiện sớm các lỗi tiềm ẩn và giảm thiểu thời gian gián đoạn.

Ví dụ thực tế về tự động hóa trong tòa nhà thông minh:

1. Hệ thống chiếu sáng thông minh: Tự động điều chỉnh độ sáng dựa trên ánh sáng tự nhiên và sự hiện diện của người.
2. Điều hòa không khí thông minh: Tự điều chỉnh nhiệt độ và luồng không khí dựa trên thời tiết, số người sử dụng, và sở thích cá nhân.

3. An ninh thông minh: Camera giám sát tích hợp AI nhận diện khuôn mặt, phát hiện chuyển động bất thường, và gửi cảnh báo tức thời.
4. Quản lý năng lượng: Giám sát và tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng, giảm chi phí vận hành và bảo vệ môi trường.

Tóm lại: Quy trình tự động hóa trong tòa nhà thông minh là sự kết hợp của công nghệ IoT, CPS, AI, và dữ liệu lớn, mang lại sự hiệu quả vượt trội trong quản lý và vận hành. Nhờ vào các hệ thống này, tòa nhà không chỉ tiết kiệm năng lượng mà còn nâng cao trải nghiệm người dùng, đảm bảo an toàn và thân thiện với môi trường.

2.6. THIẾT KẾ HỆ THỐNG TÒA NHÀ THÔNG MINH TRÊN CƠ SỞ CPS/IOT

Sơ đồ bố trí của tòa nhà thông minh được thử nghiệm hiển thị vị trí và cách lắp đặt các cảm biến được hiển thị trong hình bên dưới. Hình này thể hiện môi trường nhà ở thực tế, nơi một người sống một mình và được bố trí các cảm biến thông minh để cải thiện sức khỏe cá nhân, tức là Hỗ trợ Sống Độc lập (Ambient Assisted Living - AAL). Sơ đồ cũng cho thấy các đơn vị cảm biến khác nhau để giám sát các thông số môi trường và các đối tượng trong nhà.

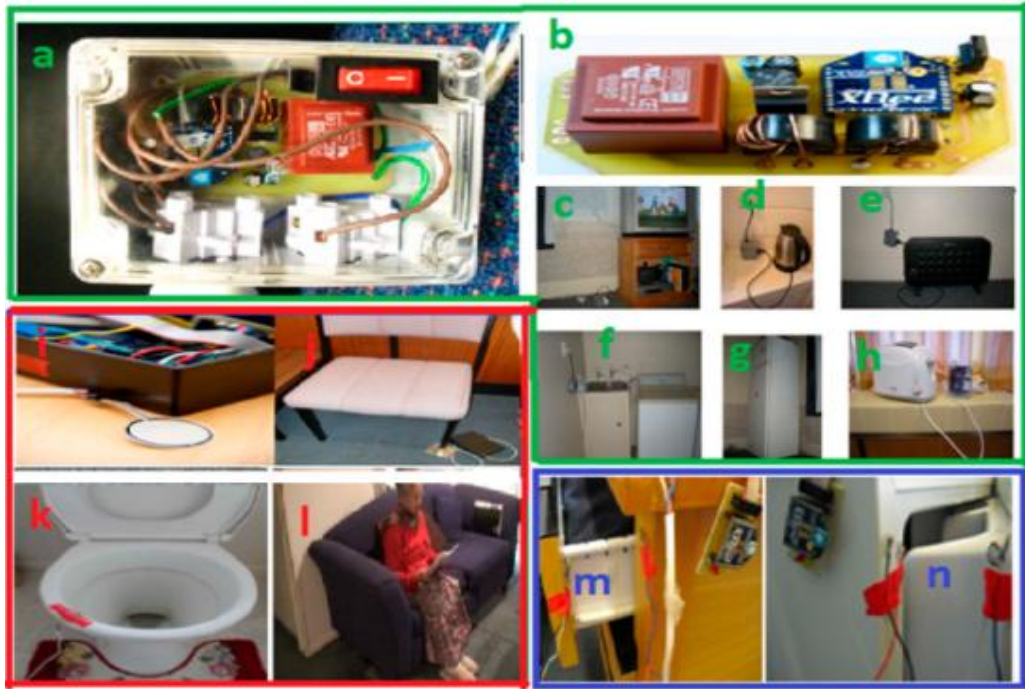
Như chúng ta có thể thấy trong hệ thống hiện tại, nó bao gồm một mạng lưới các cảm biến không đồng nhất. Các cảm biến không đồng nhất này bao gồm: cảm biến nhiệt độ, cảm biến lực, cảm biến PIR và các đơn vị giám sát thiết bị điện tử và điện (thiết bị điện và điện tử - E & E). Mô tả ngắn gọn về từng đơn vị cảm biến được trình bày như sau:



Hình 2.2. Sơ đồ cấu trúc ngôi nhà với các cảm biến được triển khai trong các đồ vật trong nhà

2.6.1. Đơn vị giám sát thiết bị điện tử và điện gia dụng

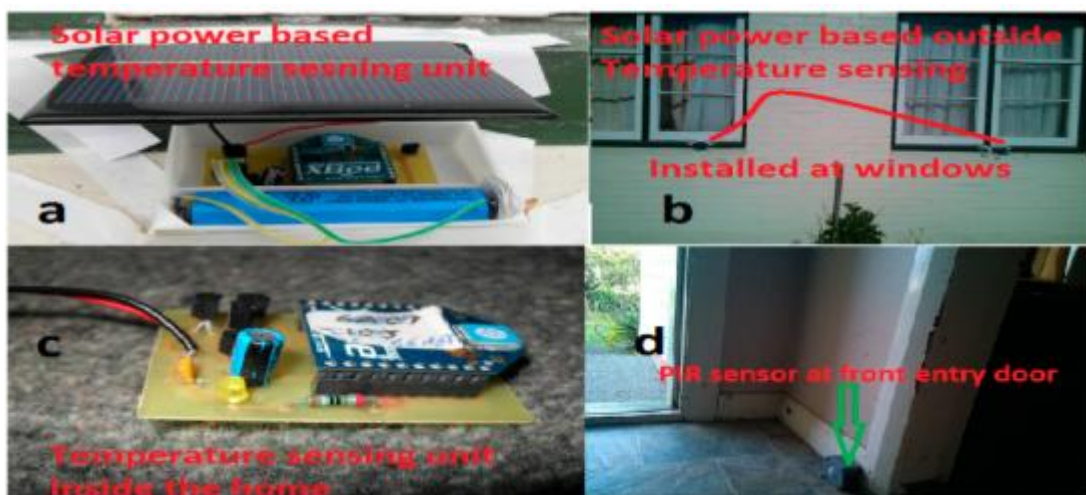
Bộ phận giám sát và kiểm soát mức sử dụng điện này chứa máy biến áp và các thành phần mạch khác. Khối máy biến áp bao gồm máy biến áp điện áp và máy biến áp dòng điện. Máy biến áp điện áp hạ áp được sử dụng để biến đổi nguồn điện từ tín hiệu 220 V xuống 10 V và máy biến áp dòng điện ASM010 được sử dụng để liên kết dòng điện trong dây dẫn với tải thông qua mạch máy biến áp dòng điện. Để khuếch đại tín hiệu, bộ khuếch đại hoạt động LM324 được áp dụng kết hợp với các thành phần khác như bộ chỉnh lưu, tụ điện và điện trở khuếch đại có các thông số cụ thể. Đầu ra tín hiệu cảm biến tương tự được cung cấp cho kênh tương tự của chip truyền thông vô tuyến để truyền không dây. Hình 2.2a, b trình bày thiết bị được thiết kế và Hình 2.2c–h cho thấy việc sử dụng thiết bị với các thiết bị gia dụng khác nhau. Dữ liệu này hữu ích để phân tích mô hình sử dụng thiết bị.



Hình 2.3. (a,b) biểu diễn đơn vị giám sát và kiểm soát việc sử dụng thiết bị điện và điện tử và (c–h) biểu diễn việc giám sát và kiểm soát các thiết bị gia dụng thông qua đơn vị này; (i) biểu diễn đơn vị cảm biến lực và (j–l) triển khai đơn vị cho các vật thể dùng để ngồi cũng như ngủ khác nhau; (m,n) biểu diễn cách sắp xếp đơn vị cảm biến tiếp xúc

2.6.2. Đơn vị giám sát nhiệt độ

Để thiết kế bộ cảm biến nhiệt độ, IC LM35 được kết nối với mạch điều hòa để theo dõi nhiệt độ môi trường. Hình 2.4a, b thể hiện việc theo dõi nhiệt độ ngoài trời và Hình 2.4c thể hiện việc theo dõi nhiệt độ phòng trong nhà.



Hình 2.4. (a,b) biểu diễn đơn vị giám sát nhiệt độ bên ngoài dựa trên năng lượng mặt trời tái tạo; (c) đơn vị giám sát nhiệt độ bên trong và (d) cảm biến PIR để giám sát hoạt động.

2.6.3. Bộ cảm biến tiếp xúc cho đồ vật trong nhà

Với mục đích giám sát việc sử dụng các vật dụng trong nhà như bàn chải chuốt và bàn làm việc văn phòng, chúng tôi đã chế tạo các hệ thống cảm biến tiếp xúc không dây và kết nối chúng. Hình 2.7m,n cho thấy bộ phận cảm biến tiếp xúc chế tạo được kết nối với bàn chải chuốt để xác định tần suất sử dụng và việc sử dụng các vật dụng này được giám sát tại máy chủ công gia đình cục bộ bằng các giá trị BẬT/TẮT.

2.6.4. Đơn vị cảm biến lực

Cảm biến flexiforce là cảm biến Piezoresistive A301 được sử dụng để tính toán lượng áp suất tác dụng lên bất kỳ vật thể nào. Khi bất kỳ áp suất nào được tác dụng lên cảm biến, điện trở của cảm biến sẽ giảm. Do đó, điện áp đầu ra sẽ tăng lên. Phạm vi điện trở thay đổi trong cảm biến lực được tìm thấy trong các loại cảm biến khác nhau. Áp suất lý tưởng nhất là được đưa vào phần tròn trung tâm của cảm biến ở cả hai bên. Cảm biến được giữ bên dưới các vật thể dùng để ngủ và ngồi lên. Cảm biến được kết nối với mạch điều hòa với nguồn điện 9 V. Hình 2.4i cho thấy bộ phận cảm biến lực và (j) đến (l) hiển thị việc triển khai bộ phận này để đo lực. Phép đo lực này được liên kết và phân tích để xác định kiểu chiếm dụng.

2.6.5. Thiết kế hệ thống nhận dạng ADL

Hệ thống nhận dạng các hoạt động sống hàng ngày (ADLs) bao gồm các yếu tố gốc của các số liệu thống kê phù hợp của các ADLs.

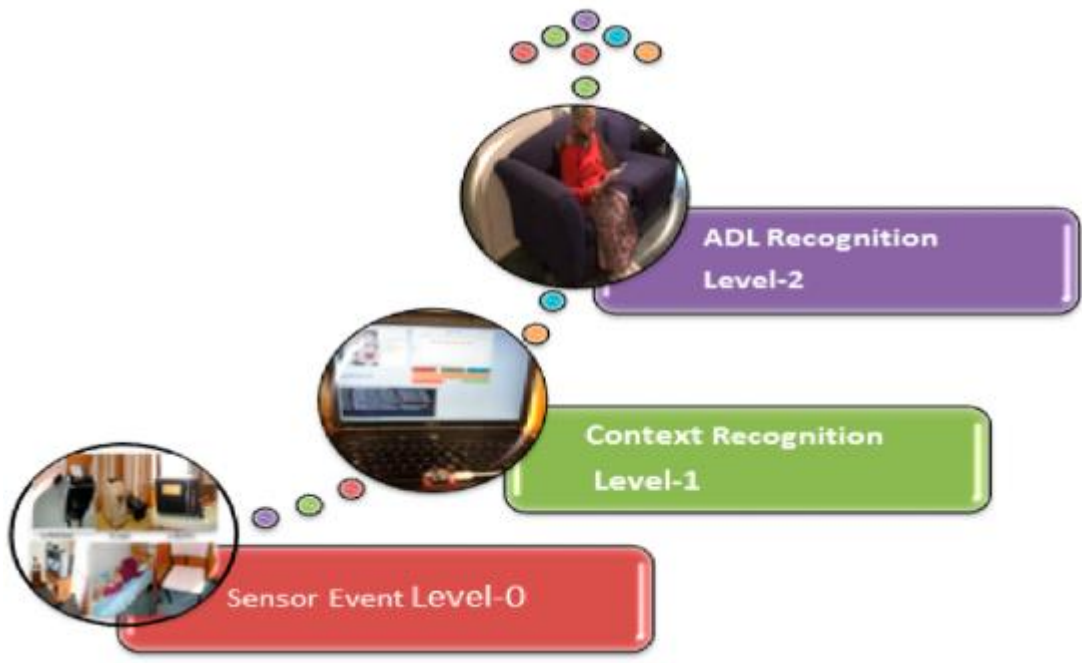
Mức độ sự kiện cảm biến 0 (Sensor Event Level 0): Mức độ này bao gồm một loạt các đơn vị cảm biến được triển khai trong môi trường AAL. Những cảm biến này chủ yếu được sử dụng để tạo ra dữ liệu quan trọng cho các mức độ cao hơn. Nó truyền tải dữ liệu cảm biến không đồng nhất liên quan đến các thống kê của đối tượng và chuyển dữ liệu đến mức độ nhận dạng ngưỡng cảnh để phân loại.

Mức độ nhận dạng ngữ cảnh 1 (Context Recognition Level 1): Mức độ này trích xuất thông tin từ dữ liệu thô và, tùy thuộc vào các giá trị chính của môi trường AAL về vị trí (S), thời gian (T) và ngữ cảnh (C), thông tin tình huống sẽ được xác định từ việc nhận dạng các ADLs cơ bản.

Mức độ nhận dạng ADLs 2 (ADLs Recognition Level 2): Phân loại các ADLs cơ bản sẽ được thực hiện dựa trên thông tin ngữ cảnh và trạng thái của dòng cảm biến.

Tại Mức độ 0 (phần dưới), tất cả dữ liệu cảm biến thô từ việc sử dụng thiết bị gia dụng và chuyển động được chuyển đến bộ điều phối gắn với cổng kết nối gia đình cục bộ, và máy chủ cục bộ này lưu trữ các tập dữ liệu chưa cấu trúc để xử lý và phân tích thêm. Dữ liệu cảm biến thô thu thập tại phần thông tin thấp hơn chỉ có thể xác định cảm biến nào đang hoạt động hoặc không hoạt động và vào thời điểm nào. Để khám phá các hoạt động sống hàng ngày nhằm cải thiện sức khỏe, các tập dữ liệu này cần được phân tích bởi phần mềm logic ở phần trên.

Ngữ cảnh (Mức độ 1) được thiết kế để nhận dạng ngữ cảnh mà tại đó giá trị cảm biến được tạo ra. Mức độ này trích xuất thông tin từ dữ liệu cảm biến và tùy thuộc vào cài đặt AAL, các giá trị cơ bản về vị trí, thời gian và ngữ cảnh, thông tin tình huống được rút ra từ việc nhận dạng các ADL tương ứng. ADL (Mức độ 2) được sử dụng để nhận dạng hoạt động dựa trên ngữ cảnh và giá trị cảm biến, và việc gắn nhãn cho nhận dạng ADL cơ bản sẽ được thực hiện ở mức độ này. Hình 2.5 minh họa quá trình nhận dạng các ADLs, bao gồm Mức độ sự kiện cảm biến, Mức độ nhận dạng ngữ cảnh và Mức độ nhận dạng ADL.



Hình 2.5. Nhận dạng hoạt động được chia thành ba cấp độ khác nhau

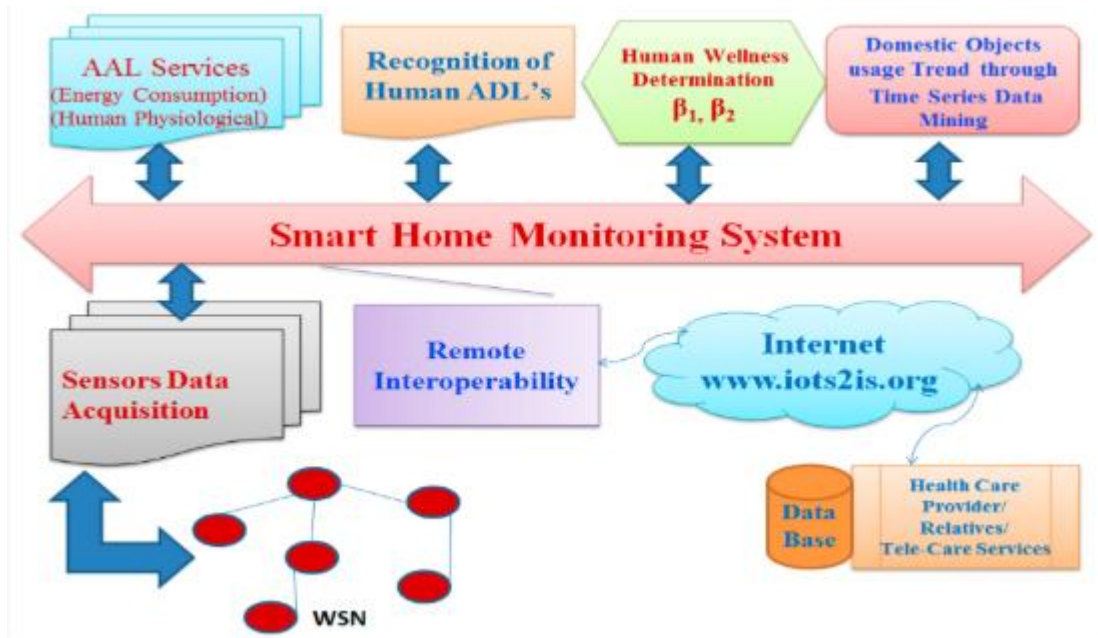
2.6.6. Chức năng chăm sóc sức khỏe

Các chức năng sức khỏe được thể hiện một biểu thức toán học và xác định mức độ sức khỏe của một cá nhân sống trong môi trường giám sát thời gian thực. Hai chức năng sức khỏe β_1 và β_2 xác định mức độ sức khỏe của người cư trú dựa trên việc sử dụng các thiết bị gia dụng. Mục đích của các chức năng sức khỏe là để xác định "mức độ" mà người cư trú sử dụng các vật dụng hàng ngày.

Chức năng đầu tiên β_1 được tính từ việc không sử dụng và thời gian thiết bị không hoạt động. Trong khi chức năng thứ hai β_2 được tạo ra từ việc sử dụng quá mức một số thiết bị cụ thể. Chỉ số sức khỏe cho thấy hành vi của người đó đối với việc sử dụng các vật dụng hàng ngày trong thời gian thực.

Hình 2.11 mô tả chức năng của hệ thống giám sát nhà thông minh dựa trên sức khỏe. Các hệ thống nhà thông minh đã được phát triển để quan sát sức khỏe của những người cao tuổi sống độc lập trong chính ngôi nhà của họ. Hệ thống nhà thông minh được phát triển có khả năng giám sát đồng thời các hoạt động thể chất tổng quát của người cư trú cũng như các yếu tố sinh lý và môi trường xung quanh. Đây là một hệ thống cảm biến đa mô hình, không gây cản trở, không xâm lấn, được triển khai ở các vị trí trung tâm trong môi trường sống.

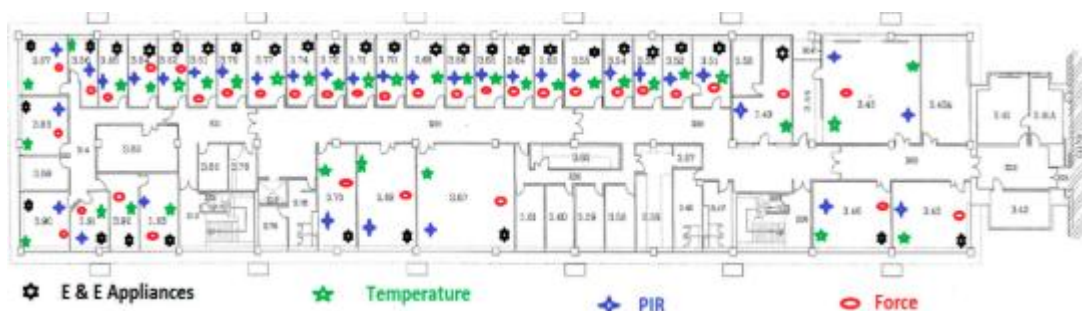
Việc giám sát liên tục trong nhà có thể được thực hiện với một máy chủ công gia đình cục bộ duy nhất. Các mô-đun phần mềm phân tích và ra quyết định được phát triển hoạt động trong môi trường phần mềm Windows. Thông qua kết nối internet, chúng ta có thể truy cập thông tin sức khỏe từ một vị trí từ xa.



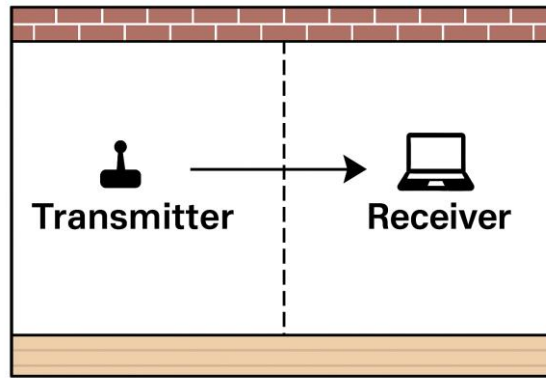
Hình 2.6. Mô tả chức năng của hệ thống giám sát nhà thông minh đã phát triển

2.7. ÁP DỤNG VÀO HỆ THỐNG TÒA NHÀ THÔNG MINH

Với phương pháp hiện tại đã nêu ở trên, dưới đây là một tầng của tòa nhà với vị trí lắp đặt các cảm biến.



Hình 2.7. Bố cục tòa nhà thể hiện vị trí đặt cảm biến.



Hình 2.8. Vị trí đặt cảm biến trong phòng

Hiệu suất tối ưu trong các dịch vụ thông minh chỉ có thể đạt được khi hệ thống đảm bảo được độ tin cậy cao nhất. Để đạt được điều này, dữ liệu người dùng cần được truyền, nhận và xử lý trong một khoảng thời gian xác định, gần thời gian thực, với độ chính xác cao và sai số tối thiểu.

Trong các hệ thống tòa nhà thông minh sử dụng mạng cảm biến không dây (WSN: Wireless Sensor Network)), việc đánh giá độ tin cậy từ góc độ hiệu năng hệ thống là một thách thức, do truyền thông vô tuyến chịu ảnh hưởng bởi nhiều biến số không kiểm soát được. Độ tin cậy thường được hiểu là độ tin cậy dữ liệu, bao gồm các yếu tố như khả năng truyền và nhận dữ liệu, độ trễ, và sai số đo lường. Việc truyền và nhận dữ liệu phụ thuộc đáng kể vào chất lượng của liên kết vô tuyến giữa các nút cảm biến. Mặc dù thiết kế phần cứng và kiến trúc của các nút cảm biến đóng vai trò quan trọng trong hiệu năng chung, dữ liệu đầu vào không chính xác sẽ làm suy giảm toàn bộ độ tin cậy hệ thống.

Trên thực tế, ngay cả khi chất lượng liên kết RF tốt và thiết kế nút cảm biến được tối ưu, độ chính xác thu được vẫn có thể không đạt yêu cầu. Nguyên nhân chính thường đến từ các chiến lược định tuyến không phù hợp và sự phức tạp của môi trường vật lý trong nhà. Trong bối cảnh đô thị, các chướng ngại vật như tường, thiết bị nội thất và tín hiệu nhiễu có thể làm suy giảm hoặc gây mất gói dữ liệu. Ngoài ra, việc bố trí mạng không hợp lý — chẳng hạn như khi một nút đầu cuối không thể kết nối với nút định tuyến gần nhất — sẽ dẫn đến thất thoát dữ liệu.

Tuy tín hiệu vô tuyến truyền với tốc độ ánh sáng, độ trễ truyền tải thường rất nhỏ và có thể được bỏ qua trong nhiều ứng dụng. Tuy nhiên, trong hệ thống nhà thông minh, nơi yêu cầu phản hồi gần thời gian thực, độ trễ tích lũy tại nút tập trung (sink node) có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả hệ thống. Do đó, yếu tố này vẫn cần được xem xét nghiêm túc trong thiết kế tổng thể.

Để mô tả và phân tích độ tin cậy trong mạng cảm biến ZigBee, các thông số sau được sử dụng phổ biến:

- Tỷ lệ chuyển gói thành công (Packet Delivery Ratio – PDR)
- Tỷ lệ thành công gói tin (Packet Success Rate – PSR)
- Tỷ lệ mất gói (Packet Loss Rate – PLR)
- Tỷ lệ lỗi gói tin (Packet Error Rate – PER)
- Cường độ tín hiệu nhận được (RSSI)
- Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR)
- Độ trễ gói tin (Latency)

Để đánh giá các chỉ số trên trong môi trường thực tế, một mô hình tòa nhà thông minh đã được xây dựng dựa trên chuẩn IEEE 802.15.4 (ZigBee), với mục tiêu phục vụ các ứng dụng điều khiển và giám sát không có độ trễ rõ rệt. Kết quả thực nghiệm cho thấy các yếu tố như khoảng cách giữa các nút, môi trường triển khai, và vị trí đặt cảm biến là những nhân tố quyết định đến độ tin cậy tổng thể của mạng cảm biến.

Để hiểu sâu hơn về các kết quả thực nghiệm, cần tiến hành xây dựng và phân tích bộ thông số liên quan đến độ tin cậy gói tin. Theo đó, một gói tin được đánh giá là đáng tin cậy khi nó được truyền từ nút nguồn đến nút đích mà không bị biến dạng hoặc nhiễu loạn. Điều này được xác định thông qua so sánh số lượng gói tin gửi và nhận. Các chỉ số PDR, PSR, PER và PLR có mối tương quan chặt chẽ với độ chính xác dữ liệu ở các lớp khác nhau của hệ thống và đóng vai trò là chỉ báo tổng hợp về độ tin cậy cũng như hiệu suất vận hành của mạng cảm biến không dây.

Trong các hệ thống tòa nhà thông minh dựa trên mạng cảm biến không dây (WSN), việc đánh giá độ tin cậy từ góc nhìn hiệu suất hệ thống là một thách thức không nhỏ. Điều này chủ yếu xuất phát từ tính chất đặc thù của truyền thông vô tuyến, vốn chịu ảnh hưởng bởi nhiều biến số có khả năng làm suy giảm độ tin cậy tổng thể.

Cách hiểu phổ biến nhất về độ tin cậy trong ngữ cảnh này là độ tin cậy dữ liệu, bao gồm các yếu tố như khả năng truyền và nhận dữ liệu chính xác, sai số đo lường và độ trễ truyền thông. Khả năng truyền và nhận dữ liệu phụ thuộc vào môi trường truyền thông giữa các nút cảm biến, trong đó chất lượng liên kết vô tuyến đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo luồng dữ liệu ổn định và đáng tin cậy.

Mặc dù thiết kế phần cứng và cấu trúc logic của các nút cảm biến có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất hệ thống — vì chúng là nguồn tạo ra dữ liệu — nhưng nếu dữ liệu từ nguồn đã bị sai lệch hoặc hỏng ngay từ đầu, thì toàn bộ hệ thống sẽ không thể đạt được mức độ chính xác mong muốn.

Thực tế cho thấy rằng, ngay cả khi chất lượng liên kết vô tuyến (RF) được đánh giá là tốt và thiết kế cảm biến được tối ưu, độ chính xác dữ liệu đầu ra vẫn thường không đạt yêu cầu. Nguyên nhân chủ yếu là do các chiến lược định tuyến không phù hợp, kết hợp với đặc điểm môi trường trong nhà — đặc biệt trong bối cảnh đô thị — nơi có nhiều vật cản gây nhiễu hoặc làm mất tín hiệu. Việc bố trí mạng không hiệu quả có thể dẫn đến hiện tượng mất gói, ví dụ như khi một nút thiết bị đầu cuối không thể tìm thấy nút định tuyến gần nhất, dẫn đến thất thoát dữ liệu.

Về mặt lý thuyết, tín hiệu vô tuyến truyền với vận tốc ánh sáng, do đó độ trễ thường rất nhỏ và có thể bỏ qua trong nhiều ứng dụng. Tuy nhiên, trong bối cảnh hệ thống nhà thông minh tập trung vào xử lý thông minh theo thời gian thực, thì độ trễ tích lũy tại nút thu (sink node) vẫn đủ để ảnh hưởng đáng kể đến khả năng phát hiện, phân tích hoặc phản hồi theo thời gian thực. Do đó, yếu tố độ trễ cần được cân nhắc cẩn trọng trong giai đoạn thiết kế hệ thống.

Độ tin cậy trong mạng cảm biến không dây (WSN), đặc biệt là các hệ thống sử dụng chuẩn ZigBee (IEEE 802.15.4), có thể được đánh giá rõ ràng hơn thông qua tập hợp các chỉ số liên quan đến độ tin cậy gói tin.

Các thông số này đóng vai trò then chốt trong việc định lượng độ tin cậy và hiệu năng tổng thể của hệ thống WSN. Để đánh giá toàn diện các chỉ số trên trong môi trường thực tế, một mô hình tòa nhà thông minh đã được thiết lập và triển khai theo thời gian thực, với mục tiêu hỗ trợ các ứng dụng giám sát và điều khiển mà không phát sinh độ trễ đáng kể. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng khoảng cách giữa các nút, điều kiện môi trường triển khai và vị trí đặt cảm biến là những yếu tố có ảnh hưởng quyết định đến độ tin cậy của mạng.

Để hiểu và phân tích chính xác những kết quả thu được, cần xây dựng mô hình đánh giá cụ thể dựa trên các chỉ số độ tin cậy gói tin. Theo đó, một gói tin chỉ được xem là truyền thành công khi nó được chuyển từ nút nguồn đến nút đích mà không bị biến dạng, mất mát hay can thiệp làm sai lệch nội dung. Mức độ tin cậy này thường được xác định bằng cách so sánh số lượng gói tin được gửi từ nút nguồn với số lượng gói tin thực sự nhận được tại nút đích.

Các chỉ số như PDR, PSR, PER và PLR có mối quan hệ chặt chẽ với độ tin cậy truyền dẫn và phản ánh mức độ chính xác của dữ liệu ở các lớp khác nhau trong hệ thống mạng cảm biến. Việc giám sát và phân tích các thông số này giúp xác định sớm các điểm yếu trong mạng lưới, đồng thời cung cấp cơ sở cho việc tối ưu hóa cấu trúc mạng, chiến lược định tuyến và vị trí triển khai cảm biến.

PDR: Tỷ lệ phân phối gói tin là số gói tin nhận được tại bộ điều phối so với số gói tin được gửi từ bộ phát; tỷ lệ này được biểu thị bằng phần trăm.

$$PDR(\%) = \frac{N_r}{N_s} \times 100 \quad (2.1)$$

Trong đó: N_r : Tổng số gói tin mà bộ điều phối nhận được từ thiết bị đầu cuối.

N_s : Tổng số gói tin được gửi bởi thiết bị đầu cuối.

Giá trị PDR càng cao thì hiệu suất hệ thống và độ tin cậy của gói tin càng tốt.

PSR: Tỷ lệ thành công của gói tin là số gói tin được nhận thành công mà không có bất kỳ lỗi nào so với số gói tin được nhận tại bộ điều phối; tỷ lệ này được biểu thị bằng phần trăm.

$$PSR(\%) = \frac{N_{we}}{N_r} \times 100 \quad (2.2)$$

Trong đó: N_r : Tổng số gói tin mà bộ điều phối nhận được từ thiết bị đầu cuối..

N_{we} : Tổng số gói tin mà bộ điều phối nhận được từ thiết bị đầu cuối mà không có lỗi xảy ra.

Giá trị PSR càng cao thì hiệu suất hệ thống và độ tin cậy của gói tin càng tốt.

PER: Tỷ lệ lỗi gói tin là hàm của số gói tin được nhận thành công và số gói tin được nhận tại bộ điều phối; tỷ lệ này được biểu thị bằng phần trăm.

$$PER(\%) = \frac{N_r - N_{we}}{N_r} \times 100 \quad (2.3)$$

Trong đó: N_r : Tổng số gói tin mà bộ điều phối nhận được từ thiết bị đầu cuối..

N_{we} : Tổng số gói tin mà bộ điều phối nhận được từ thiết bị đầu cuối mà không có lỗi xảy ra.

Giá trị PER càng thấp thì hiệu suất hệ thống và độ tin cậy của gói tin càng tốt.

PLR: Tỷ lệ mất gói tin là hàm của số gói tin nhận được tại bộ điều phối và số gói tin được gửi từ bộ phát; tỷ lệ này được biểu thị bằng phần trăm.

$$PLR(\%) = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \quad (2.4)$$

Trong đó: N_r : Tổng số gói tin mà bộ điều phối nhận được từ thiết bị đầu cuối..

N_s : Tổng số gói tin được gửi bởi thiết bị đầu cuối.

Giá trị PLR thấp hơn mang lại hiệu suất hệ thống và độ tin cậy của gói tin tốt hơn.

Ngoài yếu tố khoảng cách, vị trí đặt thiết bị đầu cuối trong môi trường đô thị cũng có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất hoạt động của hệ thống nhà thông minh dựa trên mạng cảm biến không dây (WSN). Chất lượng liên kết truyền thông thường bị suy giảm nghiêm trọng do các vật cản vật lý như tường, cửa ra vào, bàn ghế, và các cấu trúc nội thất khác. Bên cạnh đó, nhiễu trong băng tần ISM và tải lưu lượng mạng cũng là những yếu tố góp phần làm suy giảm hiệu năng truyền dẫn.

Một trong những thách thức lớn nhất ảnh hưởng trực tiếp đến độ tin cậy và hiệu suất của hệ thống WSN là hiện tượng nhiễu nội mạng (intra-network interference), vốn có tác động tiêu cực đến quá trình phân phối gói tin. Nhiễu điện từ (EMI) được hiểu là hiện tượng gây nhiễu quá trình xử lý tín hiệu tại các nút cảm biến, xuất phát từ các nguồn phát xạ điện từ bên ngoài.

Các cảm biến không dây sử dụng giao thức ZigBee thường hoạt động trong phổ tần ISM 2.4 GHz, vốn là dải tần số không được cấp phép và không kiểm soát chặt chẽ, do đó có mức độ nhiễu cao. Trong môi trường này, nhiễu nội mạng trở nên nghiêm trọng hơn, đặc biệt khi có nhiều thiết bị cùng hoạt động trong cùng một dải tần.

Các nguồn gây nhiễu phổ biến trong băng tần ISM 2.4 GHz bao gồm:

- Bluetooth (chuẩn IEEE 802.15.1)
- USB không dây phiên bản 2 (IEEE 802.15.3)
- Wi-Fi (IEEE 802.11b/g/n)
- Thiết bị gia dụng sử dụng sóng vi ba (microwave ovens)
- Các thiết bị điện tử khác, chẳng hạn như điện thoại không dây hoặc máy dò chuyển động RF

Những nguồn phát nhiễu này, khi hoạt động đồng thời trong không gian gần nhau, có thể tạo ra xung đột và làm tăng xác suất mất gói, dẫn đến giảm hiệu quả truyền thông giữa các nút cảm biến trong mạng. Điều này đặc biệt quan trọng trong các ứng dụng đòi hỏi thời gian thực và độ tin cậy cao, như giám sát sức khỏe, an ninh, hoặc điều khiển tự động trong tòa nhà thông minh.

2.8. PHÂN TÍCH THIẾT KẾ VÀ MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG TÒA NHÀ THÔNG MINH

2.8.1. Lý do lựa chọn SysML để mô hình hóa và áp dụng cho hệ thống tòa nhà thông minh

SysML thực sự rất phù hợp để áp dụng cho các hệ thống tòa nhà thông minh, và đây là một vài lý do chính.

Hệ thống phức tạp, SysML giải quyết được.

Tòa nhà thông minh không chỉ là một cái công tắc hay một cái cảm biến. Đó là một mạng lưới phức tạp gồm nhiều hệ thống con: hệ thống chiếu sáng, điều hòa, an ninh, PCCC, năng lượng mặt trời, v.v. Tất cả chúng phải hoạt động cùng nhau một cách nhịp nhàng.

- Tích hợp mọi thứ: SysML giúp bạn vẽ ra bức tranh tổng thể, nơi bạn thấy được từng hệ thống con (như hệ thống HVAC, hệ thống an ninh) là một khối (block) riêng biệt. Điều quan trọng là bạn có thể thấy được các khối này kết nối và giao tiếp với nhau như thế nào, từ đó tránh được những mâu thuẫn hay sự cố không mong muốn khi vận hành.
- Hiểu rõ các yêu cầu: Dùng biểu đồ yêu cầu của SysML để mô tả tất cả các mong muốn: "hệ thống chiếu sáng phải tự động điều chỉnh theo ánh sáng tự nhiên", "hệ thống an ninh phải gửi cảnh báo đến điện thoại quản lý", v.v. Biểu đồ này giúp đảm bảo tất cả các yêu cầu đều được ghi nhận đầy đủ và không bị bỏ sót.

Tòa nhà thông minh được xây dựng để tối ưu hóa hiệu suất, đặc biệt là hiệu quả năng lượng.

- Tính toán hiệu quả: Biểu đồ tham số (Parametric Diagram) của SysML là một công cụ mạnh mẽ. Bạn có thể sử dụng nó để mô hình hóa các công thức vật lý và toán học. Ví dụ, bạn có thể tính toán mức tiêu thụ năng lượng của hệ thống điều hòa dựa trên nhiệt độ môi trường, số người trong phòng và các yếu tố khác. Điều này giúp bạn đưa ra quyết định thiết kế tối ưu ngay từ ban đầu.

- Mô phỏng hành vi: Bạn có thể dùng các biểu đồ hành vi như biểu đồ hoạt động để mô phỏng cách hệ thống phản ứng với các tình huống khác nhau. Ví dụ: khi có người vào phòng, cảm biến phát hiện, hệ thống chiếu sáng sẽ bật lên, sau đó điều hòa sẽ bắt đầu hoạt động.

Giao tiếp hiệu quả và hợp tác tốt hơn

Xây dựng một tòa nhà thông minh đòi hỏi sự hợp tác của nhiều bên: kiến trúc sư, kỹ sư điện, kỹ sư cơ khí, nhà phát triển phần mềm và chủ đầu tư. Mỗi người lại có một cách nói và một góc nhìn khác nhau.

- Ngôn ngữ chung: SysML cung cấp một ngôn ngữ trực quan, tiêu chuẩn hóa. Thay vì diễn đạt bằng lời nói hay văn bản dài dòng dễ gây hiểu lầm, bạn có thể dùng các biểu đồ để trình bày ý tưởng một cách rõ ràng. Một biểu đồ SysML có thể được mọi người trong dự án hiểu một cách nhất quán, bất kể chuyên môn của họ là gì.
- Tránh hiểu lầm: Nhờ có ngôn ngữ chung này, các bên liên quan có thể thảo luận và đưa ra quyết định dựa trên một mô hình trực quan, giảm thiểu rủi ro của những hiểu lầm trong quá trình thiết kế và thi công.

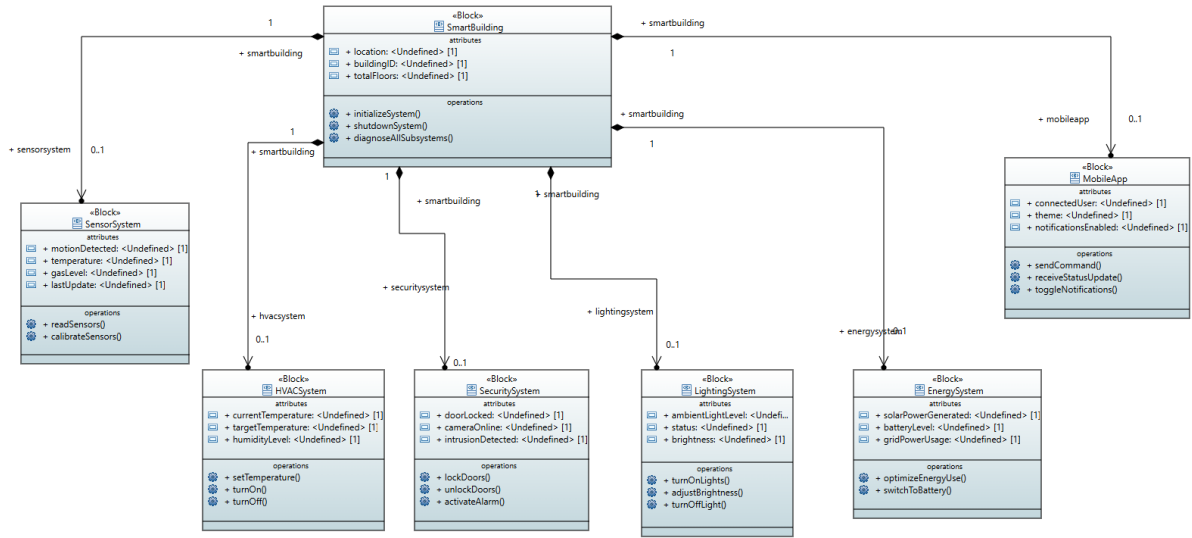
Tóm lại, việc áp dụng SysML vào thiết kế tòa nhà thông minh giống như có một bản thiết kế chi tiết và sống động, không chỉ về cấu trúc mà còn về cách thức hoạt động của toàn bộ hệ thống, từ đó giúp dự án trở nên hiệu quả, đáng tin cậy và tiết kiệm hơn rất nhiều.

2.8.2. Phần mềm thiết kế hệ thống

Phần mềm chúng ta sử dụng để xây dựng một hệ thống SysML tòa nhà thông minh ở đây chính là Eclipse Papyrus và DrawIO, các phần mềm này là trong những phần mềm phổ biến nhất dùng trong lĩnh vực thiết kế hệ thống.

2.8.3. Thiết kế tổng quan

2.8.3.1. Block Definition Diagram (Biểu đồ khối tổng quan kiến trúc hệ thống)



Hình 2.6. Biểu đồ block definition diagram

Biểu đồ Block Definition Diagram thể hiện kiến trúc tổng thể của một hệ thống tòa nhà thông minh bắt buộc phải có:

Mỗi Block có các Attribute để thể hiện thuộc tính và operation để thể hiện các hàm dùng để thực thi các chức năng tương tác với attribute

<<Block>> SmartBuilding: mô tả một đại diện thực thể của hệ thống tòa nhà thông minh.

- location: Vị trí của tòa nhà.
- buildingId: ID định danh của tòa nhà, dùng trong trường hợp nhiều tòa nhà để áp dụng vào hệ thống thành phố thông minh.
- totalFloor: số tầng.
- initializeSystem(): khởi động hệ thống.
- shutdownSystem(): tắt nguồn hệ thống.
- diagnoseAllSystem(): hàm dùng để phân tích số liệu toàn bộ hệ thống.

<<Block>> SensorSystem: mô tả hệ thống cảm biến

- motionDetected: cảm biến kiểm tra phát hiện chuyển động.
- temperature: nhiệt độ.

- gasLevel: nồng độ gas.
- lastUpdate: lần cập nhật gần nhất.
- readSensor(): hàm dùng để đọc cảm biến.
- calibrateSensor(): hàm dùng để hiệu chuẩn.

<<Block>> HVACSystem: mô tả hệ thống điều hòa thông minh

- currentTemperature: nhiệt độ hiện tại.
- targetTemperature: nhiệt độ cần đạt.
- humidityLevel: độ ẩm hiện tại.
- setTemperature(): thiết lập nhiệt độ.
- turnOn(): bật hệ thống điều hòa.
- turnOff(): tắt hệ thống điều hòa.

<<Block>> SecuritySystem: mô tả hệ thống an ninh

- doorLocked: trạng thái khóa/mở cửa chính.
- cameraOnline: tình trạng online của thiết bị camera an ninh.
- intrusionDetected: tình trạng phát hiện đột nhập.
- lockDoor(): khóa cửa.
- unlockDoor(): mở khóa cửa.
- activateAlarm(): bật chuông cảnh báo.

<<Block>> LightingSystem: mô tả hệ thống ánh sáng

- ambientLightLevel: mức độ ánh sáng xung quanh.
- status: tình trạng ánh sáng.
- brightness: độ sáng.
- turnOnLight(): bật đèn.
- adjustBrightness(): điều chỉnh ánh sáng.
- turnOffLight(): tắt đèn.

<<Block>> EnergySystem: mô tả hệ thống quản lý năng lượng

- solarPowerGenerated: năng lượng từ các thanh năng lượng mặt trời.
- batteryLevel: tình trạng năng lượng từ pin hoặc acquy.
- gridPowerUsage: tình trạng sử dụng năng lượng điện lưới.

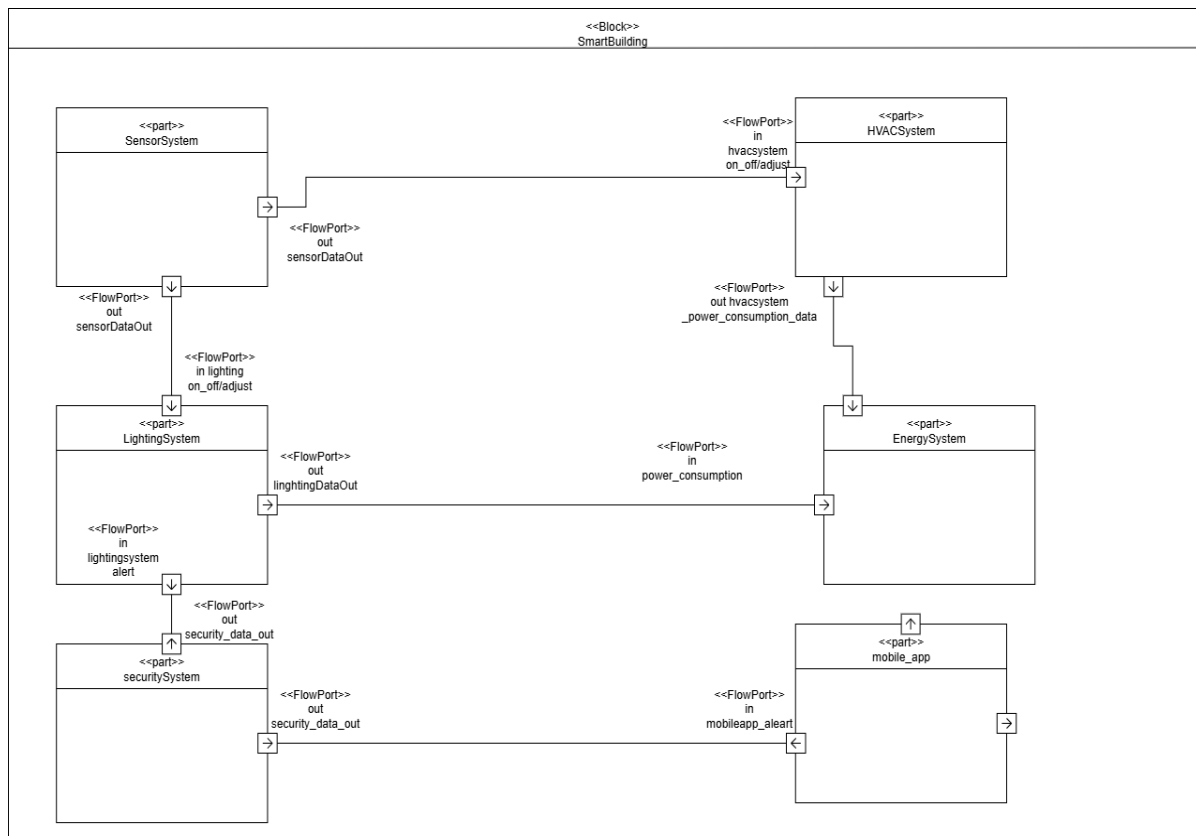
- optimizeEnergyUse(): quản.
- ajustBrightness(): điều chỉnh ánh sáng.
- turnOffLight(): tắt đèn.

<<Block>> MobileApp: mô tả hệ thống quản lý qua ứng dụng điện thoại di động

- connectedUser: người truy cập vào ứng dụng.
- theme: giao diện.
- notificationEnabled: tình trạng bật tắt thông báo.
- sendCommand(): gửi command đến hệ thống.
- receiveStatusUpdate(): nhận kết quả cập nhật trạng thái.
- toggleNotification(): gửi thông báo

Tóm lại, trong Block definition diagram ở trên đã hình dung cho chúng ta được thiết kế tổng thể của một dự án nhà thông minh để có thể nắm bắt các công việc tiếp theo

2.8.3.2. Internal Block Diagram (Biểu đồ khối thể hiện kiến trúc nội bộ)



Hình 2.7. Biểu đồ internal block diagram

Sơ đồ Internal Block Diagram (IBD) của khối SmartBuilding thể hiện kiến trúc nội bộ và các kết nối giữa các thành phần cấu thành hệ thống tòa nhà thông minh. Trong mô hình này, khối SmartBuilding bao gồm sáu thành phần chính được thể hiện dưới dạng các part, mỗi part đại diện cho một subsystem chức năng riêng biệt. Các kết nối (connectors) được mô tả rõ ràng để hiển thị cách các phần tử giao tiếp với nhau thông qua cổng (ports).

- sensorSystem (SensorSystem): Thu thập dữ liệu môi trường như: nhiệt độ, ánh sáng, chuyển động, khí gas...
- hvacSystem (HVACSystem) Điều khiển hệ thống sưởi và làm mát trong tòa nhà.
- lightingSystem (LightingSystem): Quản lý việc bật/tắt đèn, điều chỉnh độ sáng theo điều kiện môi trường.
- securitySystem (SecuritySystem): Giám sát an ninh, xử lý cảnh báo và điều khiển hệ thống khóa cửa.
- energySystem (EnergySystem): Giám sát tiêu thụ điện, phối hợp chuyển nguồn chính – dự phòng – năng lượng tái tạo.
- mobile_app (MobileApp): Cung cấp giao diện người dùng để điều khiển từ xa và nhận thông báo hệ thống.

Đây là một kịch bản minh họa luồng hoạt động nội bộ trong hệ thống: Khi hệ thống SensorSystem phát hiện chuyển động bất thường tại hành lang vào ban đêm, tín hiệu được gửi ngay đến SecuritySystem. Sau khi phân tích, SecuritySystem sẽ kích hoạt báo động và gửi cảnh báo đến MobileApp. Người dùng có thể xem cảnh báo và ra lệnh khóa cửa hoặc tắt báo động ngay từ điện thoại di động của mình. Đồng thời, hệ thống LightingSystem có thể tự động bật đèn chiếu sáng khu vực có chuyển động, dựa trên dữ liệu cảm biến thu được.

Cấu trúc của IBD trong SmartBuilding thể hiện tính mô-đun rõ ràng, tạo điều kiện thuận lợi cho việc mở rộng hệ thống trong tương lai. Việc bổ sung các hệ thống mới ví dụ như WaterLeakDetector, hay tích hợp với hệ thống thành phố

thông minh (Smart City) đều có thể thực hiện dễ dàng thông qua việc bổ sung các part và port tương ứng.

Sơ đồ Internal Block Diagram của hệ thống SmartBuilding không chỉ giúp minh họa cách các thành phần nội bộ tương tác, mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc thiết kế, triển khai và kiểm thử hệ thống. Với cấu trúc rõ ràng, logic và linh hoạt, sơ đồ IBD hỗ trợ kỹ sư trong việc đảm bảo tính nhất quán và hiệu quả trong mọi giai đoạn của vòng đời phát triển hệ thống.

2.8.3.3. Use Case Diagram (Biểu đồ luồng hoạt động)



Hình 2.8. UseCase diagram

Các tác nhân chính (Actors):

Administrator (Quản trị viên tòa nhà): Quản trị viên đóng vai trò then chốt trong việc vận hành và quản lý toàn bộ hệ thống tòa nhà thông minh. Họ có quyền truy cập cao nhất và chịu trách nhiệm về:

- Cấu hình hệ thống (Configure System): Thiết lập các thông số hoạt động, cài đặt các quy tắc tự động hóa, và tùy chỉnh giao diện người dùng theo nhu cầu cụ thể của tòa nhà.
- Xem thông báo (View Notifications): Theo dõi tất cả các cảnh báo, thông báo từ hệ thống về tình trạng thiết bị, sự cố và các hoạt động bất thường.
- Giám sát môi trường (Monitor Environment): Theo dõi liên tục các thông số môi trường như nhiệt độ, độ ẩm, chất lượng không khí, ánh sáng và tiếng ồn trong toàn bộ tòa nhà.

Residents (Cư dân): Cư dân là những người sử dụng trực tiếp các dịch vụ và tiện ích của tòa nhà thông minh. Họ tương tác với hệ thống thông qua nhiều chức năng đa dạng:

- Kiểm tra và thanh toán (Pay/Checkout): Thực hiện các giao dịch tài chính liên quan đến phí dịch vụ, tiện ích và các khoản chi phí khác.
- Yêu cầu bảo trì (Maintenance Request): Gửi yêu cầu sửa chữa, bảo trì các thiết bị hoặc cơ sở hạ tầng khi gặp sự cố.
- Mở khóa cửa (UnlockDoor): Sử dụng công nghệ thẻ từ, mã PIN hoặc sinh trắc học để ra vào các khu vực được phép.
- Khóa cửa (LockDoor): Đảm bảo an ninh bằng cách khóa cửa khi rời khỏi khu vực.
- Gửi lệnh điều khiển (SendCommand): Điều khiển các thiết bị thông minh như đèn, quạt, điều hòa không khí.
- Điều khiển ánh sáng (Control Light): Tùy chỉnh độ sáng, màu sắc và thời gian hoạt động của hệ thống chiếu sáng.
- Xem báo cáo (View Report): Truy cập các báo cáo về mức tiêu thụ năng lượng, lịch sử hoạt động và thống kê sử dụng.

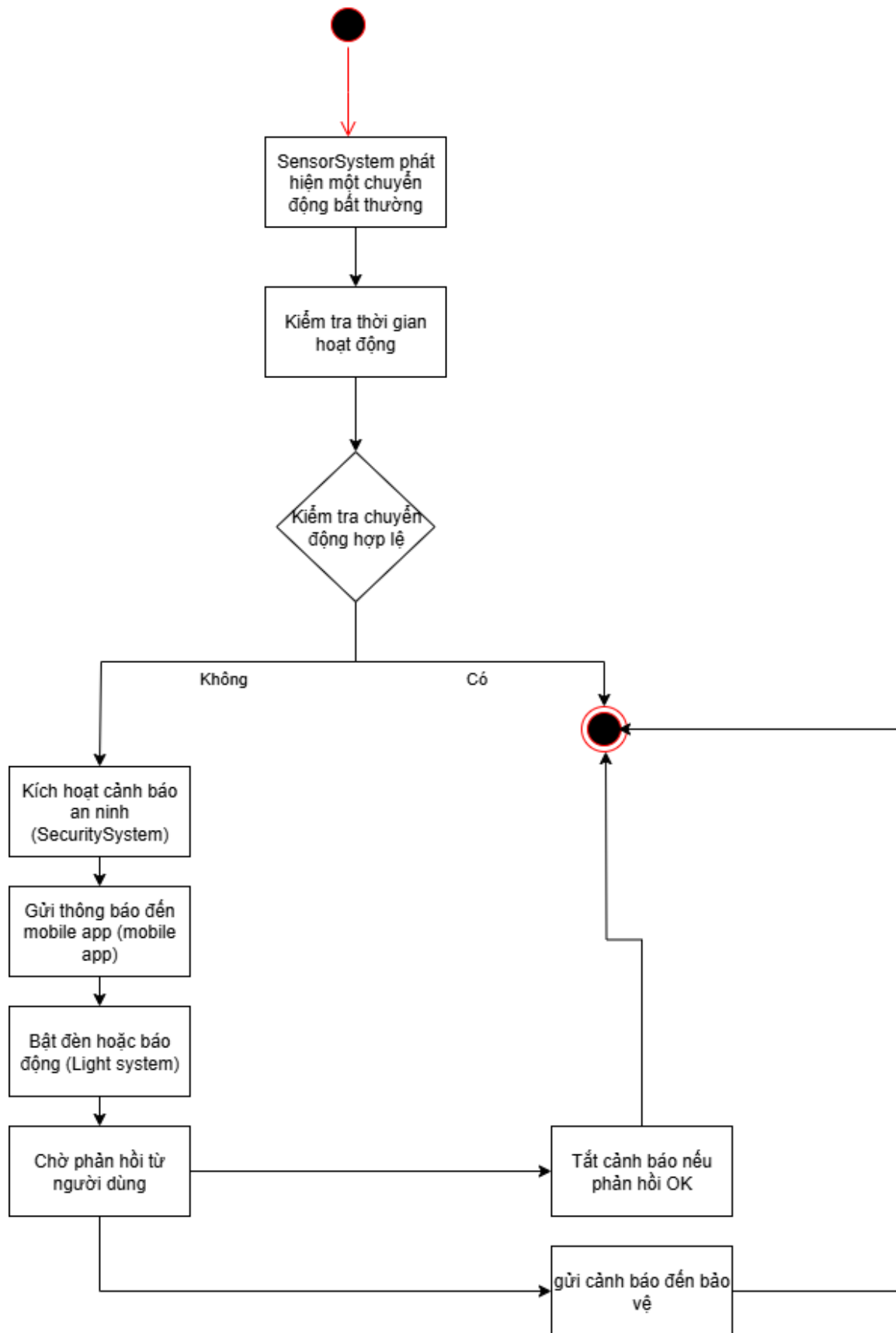
Sơ đồ thể hiện rõ mối quan hệ phức tạp giữa các thành phần:

- Mối quan hệ "include" giữa Residents và Maintenance Request cho thấy yêu cầu bảo trì là một phần không thể thiếu trong trải nghiệm cư dân
- Mối quan hệ "extend" từ Pay/Checkout đến hai phương thức thanh toán thể hiện sự linh hoạt trong lựa chọn.
- Tích hợp ứng dụng di động với hầu hết các chức năng đảm bảo người dùng có thể điều khiển mọi thứ từ smartphone.
- Dịch vụ thông báo kết nối với hệ thống thanh toán để đảm bảo minh bạch trong giao dịch.

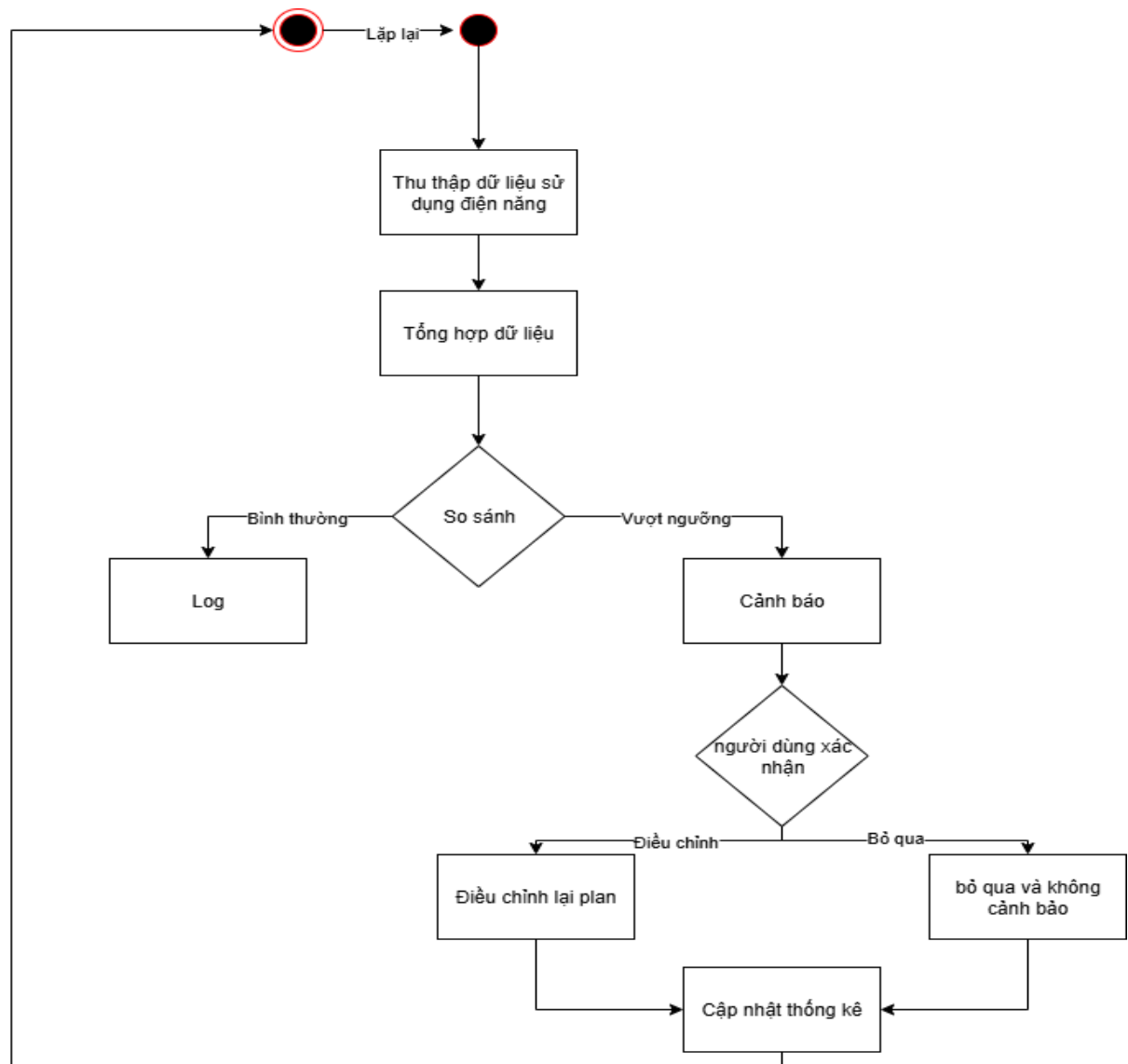
2.8.3.4. *Activity Diagram (Biểu đồ hoạt động)*

Biểu đồ hoạt động không nêu rõ chi tiết tổng thể, mà nó chỉ ra rõ một luồng hoạt động của hệ thống, từ lúc bắt đầu đến kết thúc.

Dưới đây là một vài hoạt động cụ thể

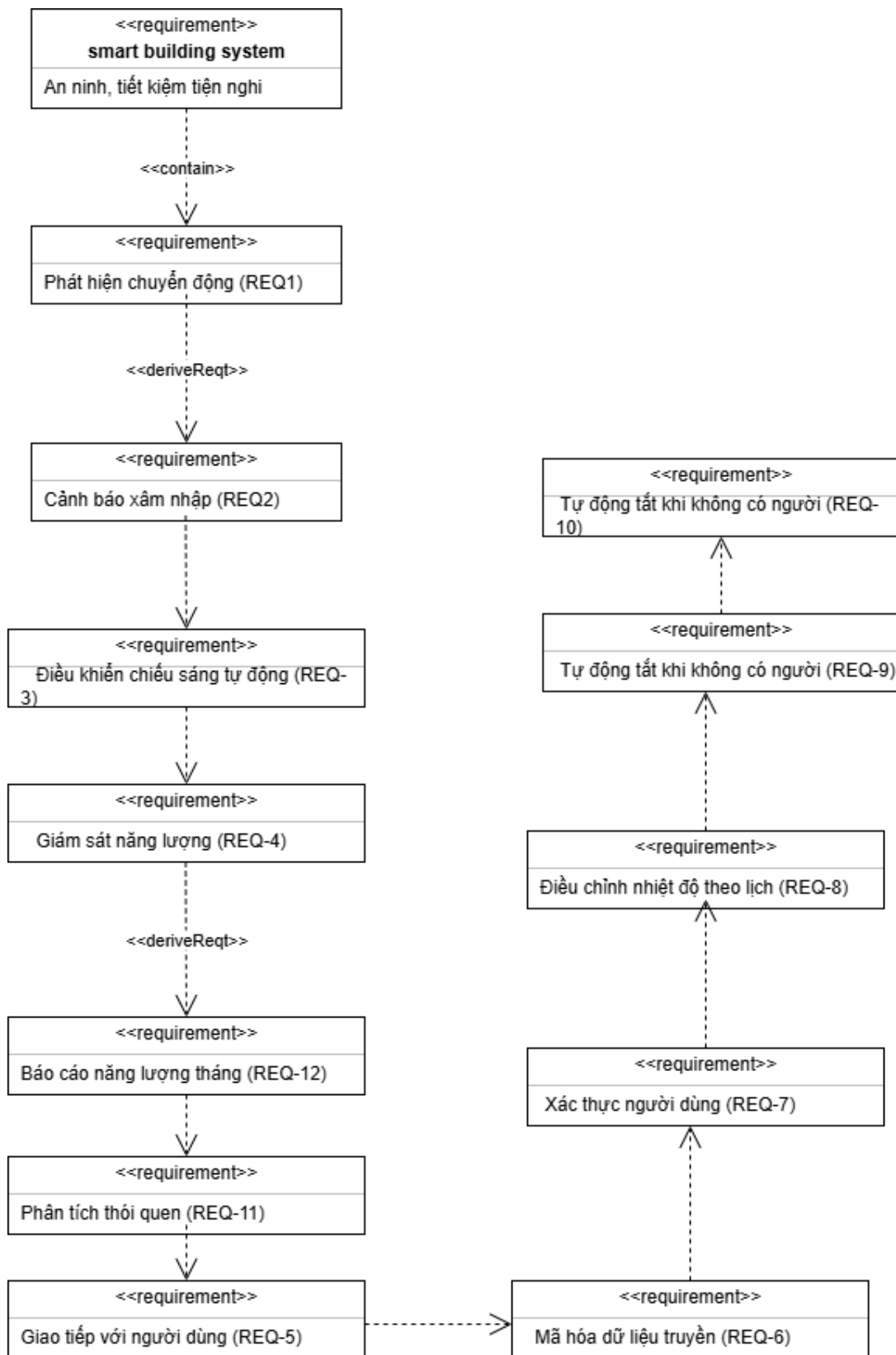


Hình 2.9: biểu đồ hoạt động của chức năng nhận diện chuyển động



Hình 2.10: biểu đồ hoạt động của chức năng thống kê năng lượng sử dụng

2.8.3.5. Requirement Diagram (biểu đồ yêu cầu)



Hình 2.11. Biểu đồ yêu cầu cơ bản của hệ thống tòa nhà thông minh

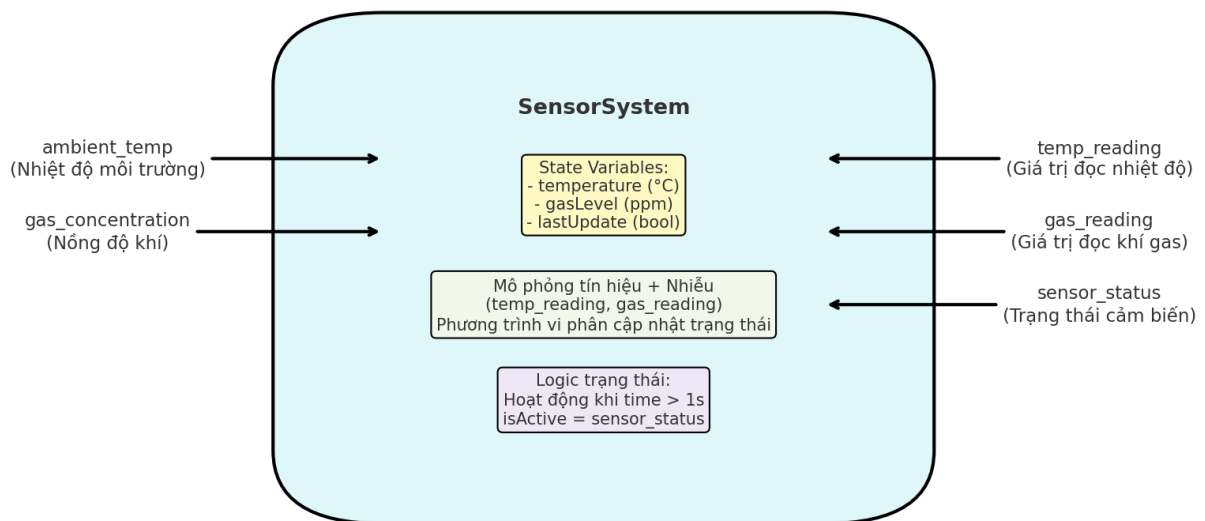
2.9. MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG TÒA NHÀ THÔNG MINH TRÊN CƠ SỞ CPS/IOT

Để đánh giá mô hình, các thực nghiệm trong nghiên cứu của đề án được tiến hành trên ngôn ngữ Open Modelica v1.20.0 sử dụng IDE OMEdit (OpenModelica Connection Editor), OMShell (Command line interface).

Open Modelica là ngôn ngữ mô hình hóa và mô phỏng mã nguồn mở, được thiết kế đặc biệt cho việc mô hình hóa các hệ thống vật lý phức tạp. Ngôn ngữ này cho phép biểu diễn trực tiếp các phương trình vi phân, đại số và tích phân mô tả hành vi, rất phù hợp để mô tả hệ thống tòa nhà thông minh trên cơ sở CPS/IoT như đã nói ở chương trên.

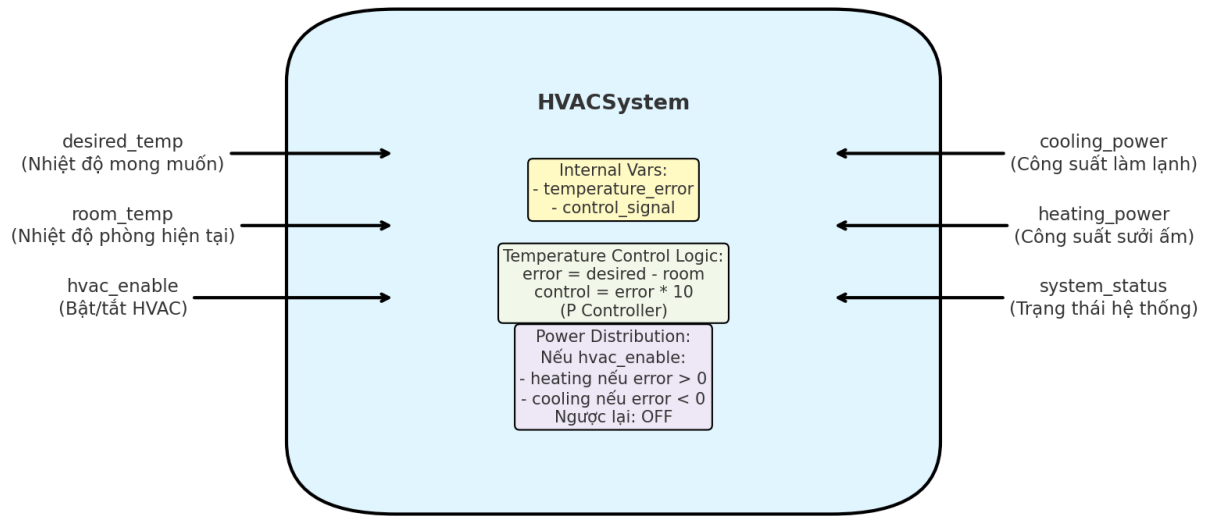
Dưới đây là các mô hình hóa bằng hình ảnh của các model, sẽ được model bằng text-based modelization trong chương thực nghiệm

2.9.1. Model Sensor (Hệ thống cảm biến)



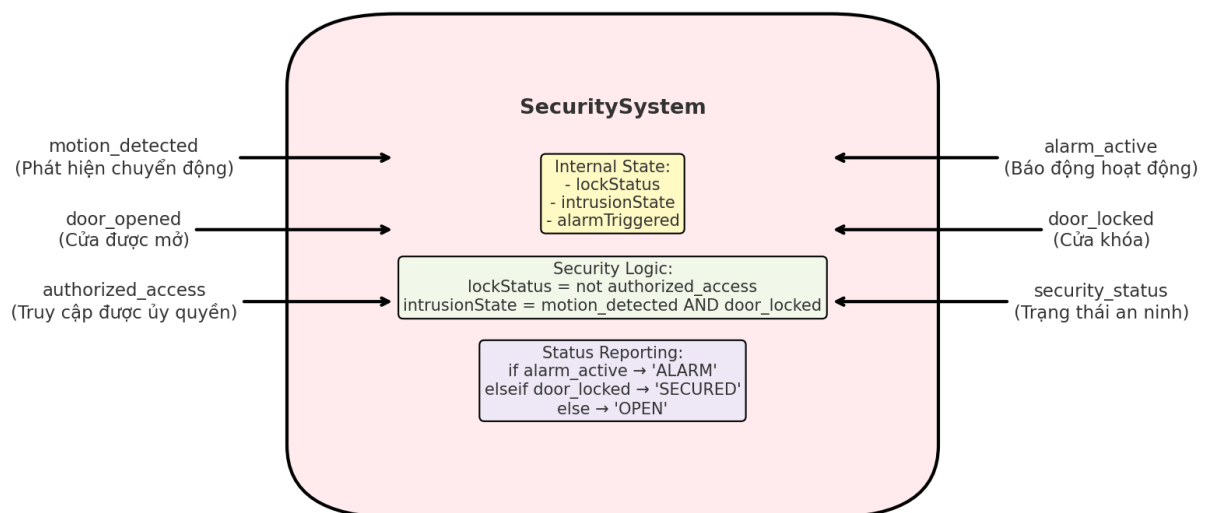
Hình 2.12. Model Sensor

2.9.2. Model HVAC System (Hệ thống điều hòa không khí)



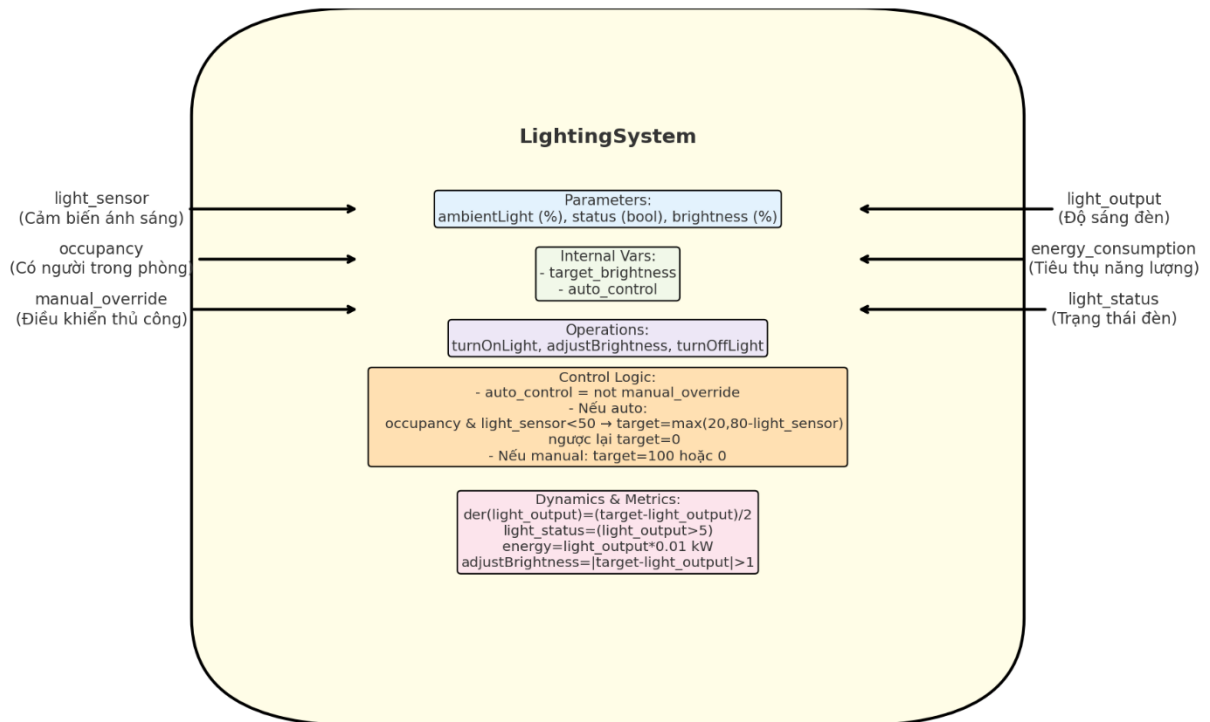
Hình 2.13. Model HVAC System

2.9.3. Model Security (Hệ thống an ninh)



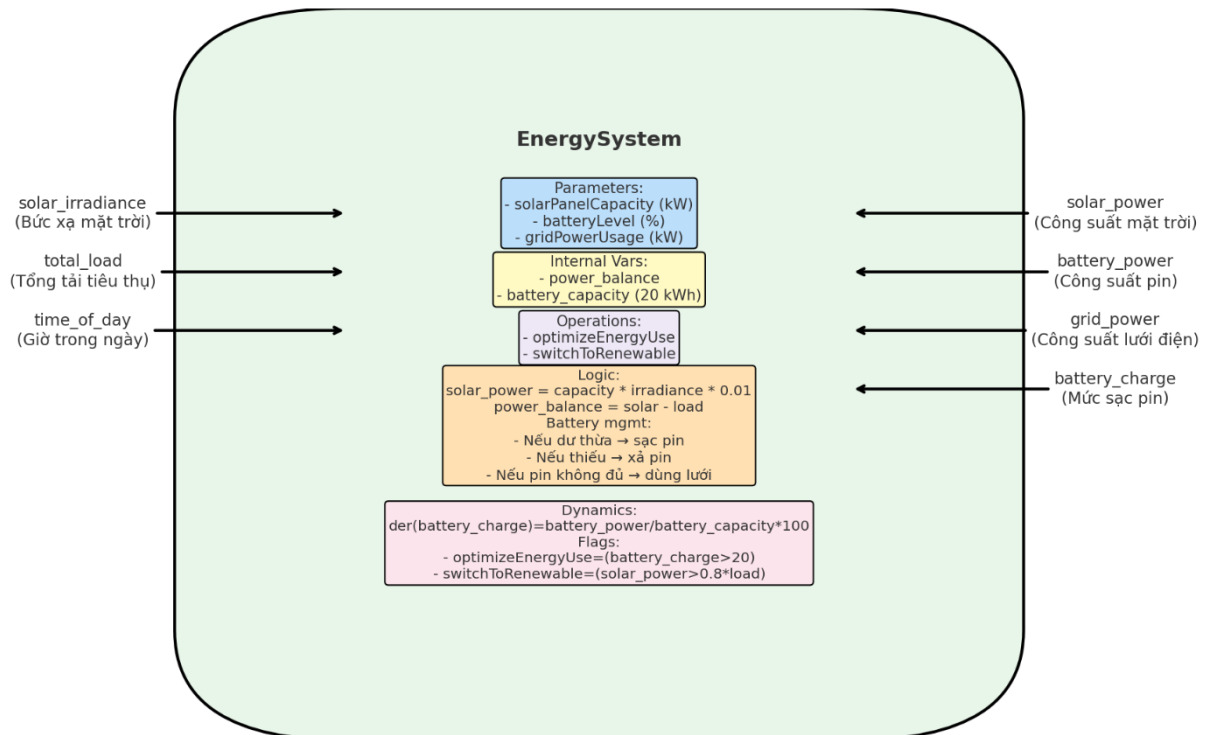
Hình 2.14. Model Security System

2.9.4. Model Lighting (Hệ thống chiếu sáng)



Hình 2.15. Model Lighting System

2.9.5. Model Energy (Hệ thống năng lượng)



Hình 2.16. Model Energy System

2.10. KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Chương này đã trình bày chi tiết cách tích hợp các công nghệ như mạng cảm biến không dây (WSN), giao thức truyền thông tiêu chuẩn (MQTT, CoAP), hệ thống điều khiển phân tán (DCS), cũng như các thuật toán học máy nhằm hỗ trợ ra quyết định dựa trên dữ liệu theo ngữ cảnh. Ngoài ra, các yếu tố về an toàn thông tin, quản lý tài nguyên năng lượng, phát hiện bất thường và khả năng tự phục hồi cũng đã được lồng ghép như một phần không thể tách rời trong kiến trúc tổng thể của hệ thống.

Thông qua việc mô hình hóa và phân rã hệ thống thành các cấu phần tương tác có tổ chức, tôi đã đề xuất một giải pháp có khả năng triển khai thực tiễn với độ tin cậy cao và chi phí hợp lý. Cách tiếp cận này góp phần hiện thực hóa mục tiêu xây dựng tòa nhà không chỉ thông minh về mặt công nghệ, mà còn hiệu quả về mặt vận hành, bền vững về mặt môi trường và hướng đến trải nghiệm người dùng.

Kết quả của nghiên cứu này để chuyển sang các bước tiếp theo trong quá trình phát triển – bao gồm mô phỏng, triển khai thử nghiệm, và đánh giá hiệu năng hệ thống. Việc chuyển từ lý thuyết sang hiện thực đòi hỏi sự kết hợp chặt chẽ giữa kỹ thuật mô hình hóa, công nghệ lập trình hệ nhúng, và phương pháp kiểm thử hệ thống, nhằm đảm bảo giải pháp đề xuất thực sự khả thi trong môi trường vận hành phức tạp và động như các tòa nhà hiện đại.

CHƯƠNG 3. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

3.1. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

Phần cứng: Cấu hình máy tính sử dụng thực nghiệm:

- RAM: 16GB DDR4
- CPU: Intel Core i7 8750H.
- GPU: GTX 1060 6GB RAM

Phần mềm:

- OS: Windows 10
- OMEdit và OMEdit Console

Mạng truyền thông:

- Mạng WIFI 5GHZ

Ngôn ngữ mô phỏng:

- Open Modelica

Bảng các kịch bản thử nghiệm:

STT	Mã kịch bản	Tên kịch bản	Chú thích
1	TN001	Ngày thường	Kịch bản một ngày thường để làm cơ sở
2	TN002	Ngày nóng cực điểm	Kịch bản một ngày nóng cực điểm để so với ngày bình thường
3	TN003	Giả lập tiết kiệm năng lượng	Giả lập sự tiết kiệm năng lượng của các thiết bị tạo năng lượng và tổng tải
4	TN004	Giả lập sự cố an ninh	

Bảng 3.1. Bảng kịch bản thử nghiệm

3.2. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Sau khi text-visualization vào IDE Omedit, sẽ được nêu ở phụ lục, ta thiết lập chạy với các tham số sau:

parameter Real simulation_day = 1 "Số ngày mô phỏng";

parameter Real temp_variation = 5 "Biến đổi nhiệt độ (°C)";

parameter Real base_temp = 30 "Nhiệt độ cơ sở (°C)";

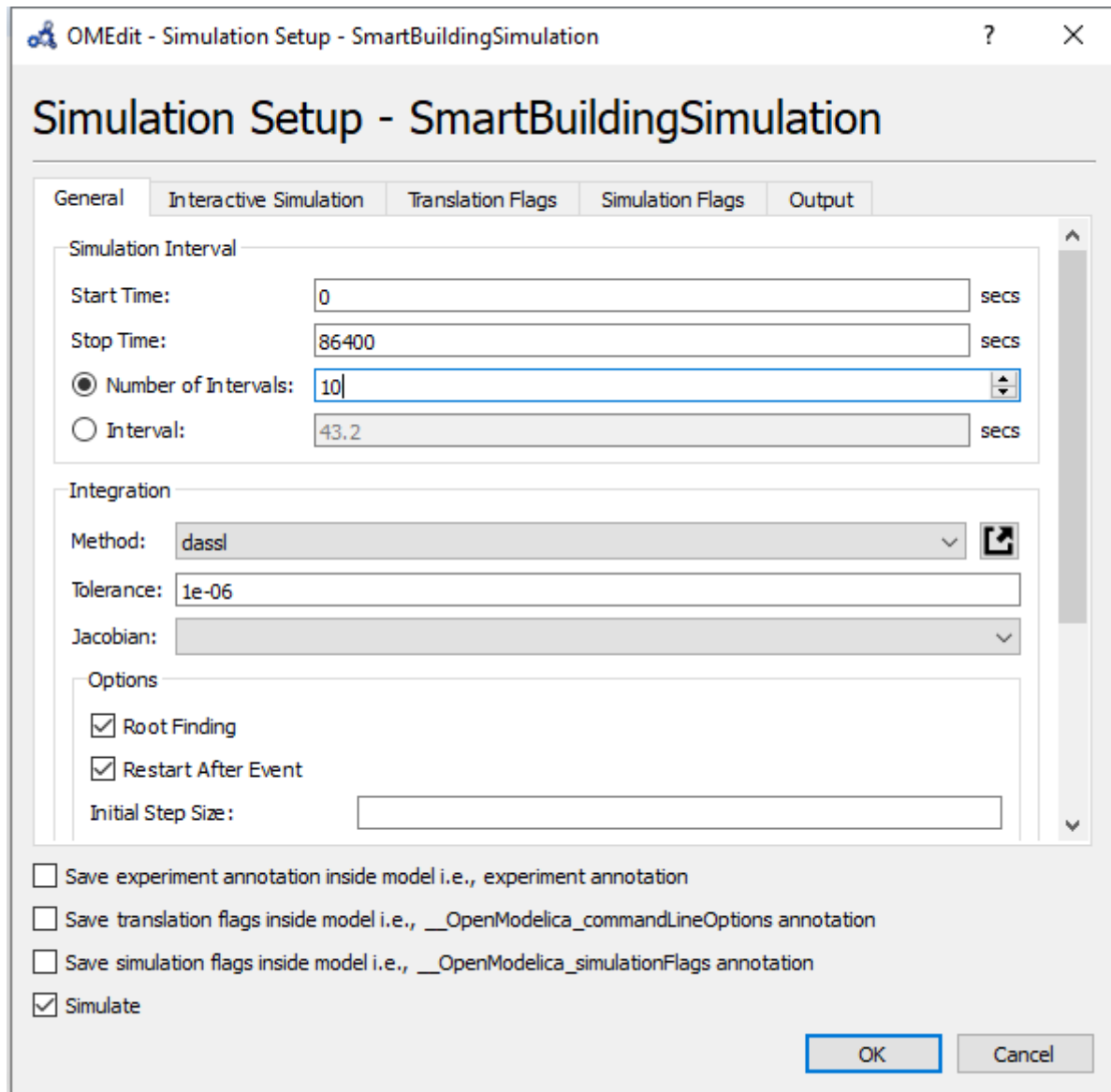
// Điều chỉnh inputs:

outdoor_temp = base_temp + temp_variation*sin(time/43200*3.14159)

"Chu kỳ 24h";

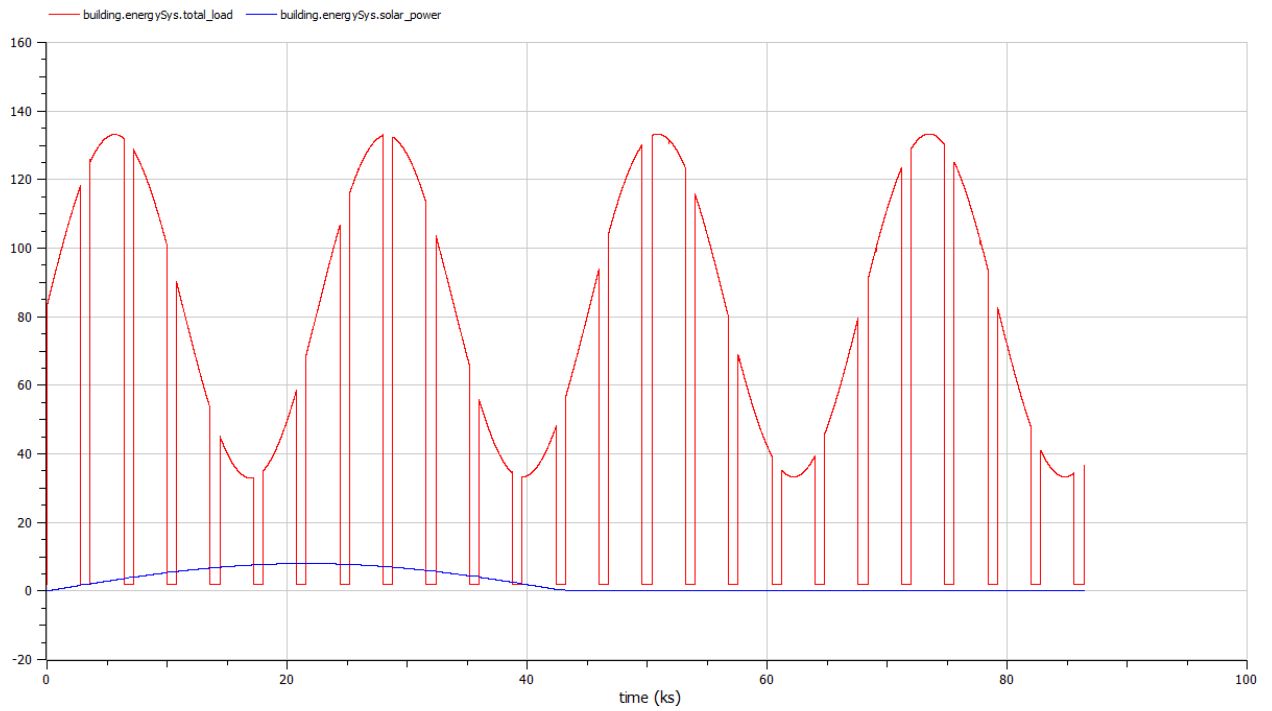
solar_radiation = max(0, 800*sin((time-21600)/43200*3.14159)) "Mặt trời 6h-18h";

occupancy_detected = (mod(time,86400) > 25200) and (mod(time,86400) < 79200) "7h-22h có người";

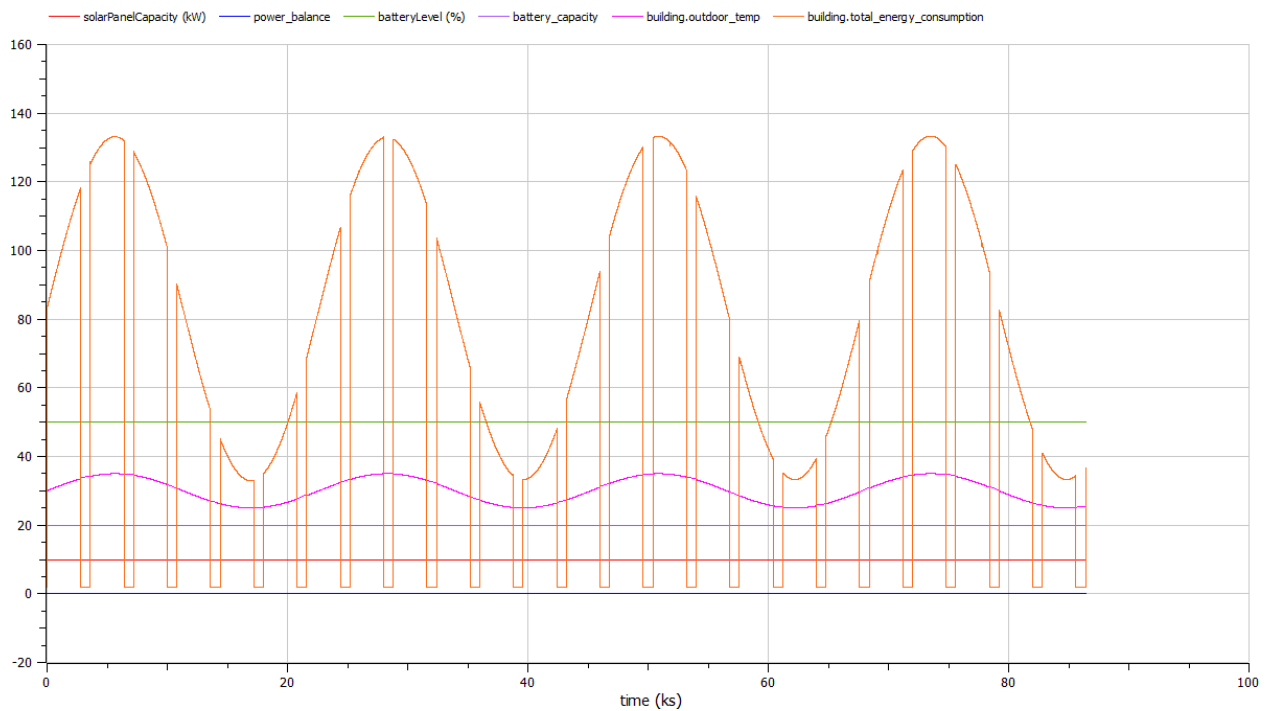


Hình 3.1. Tham số đầu vào để giả lập

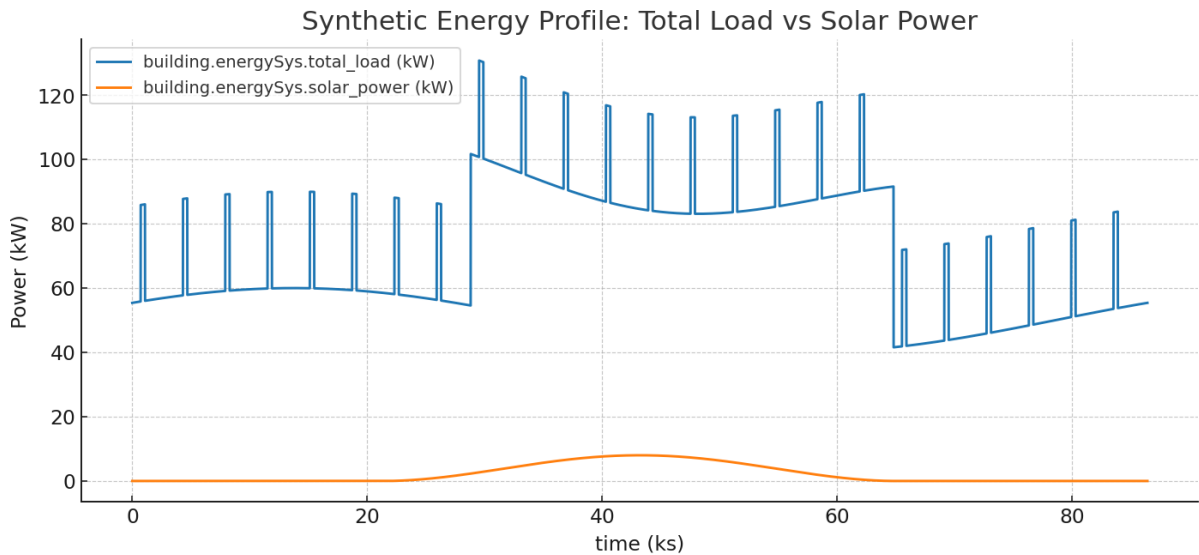
Thông số giả lập 86400s tương đương với 24h, với 10 lần lặp
 Bấm OK, sau khi đợi 10s.
 Ta có thể thống kê dựa theo 1 số tiêu chí mà chúng có quan hệ với nhau



Hình 3.2. Thông số dựa trên mối quan hệ giữa tổng tải và năng lượng thu được từ năng lượng mặt trời, trục x là times, y là kw

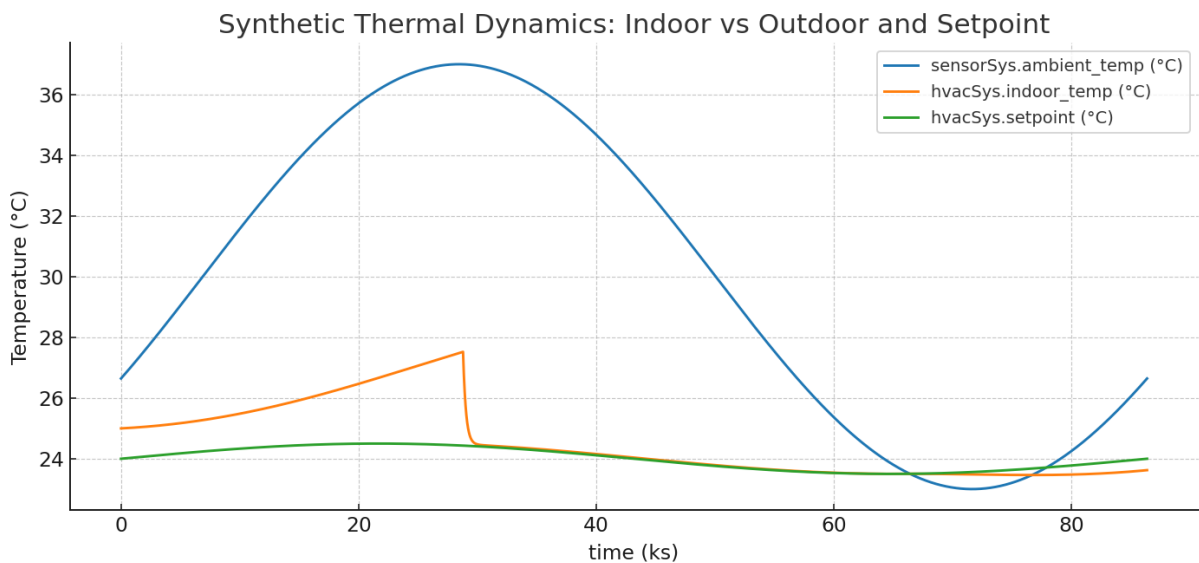


Hình 3.3. Thông số dựa trên mối quan hệ giữa tổng tải điện mặt trời và năng lượng mặt trời, mức pin, dung tích pin và tổng năng lượng tiêu thụ, trục x là times, y là kw



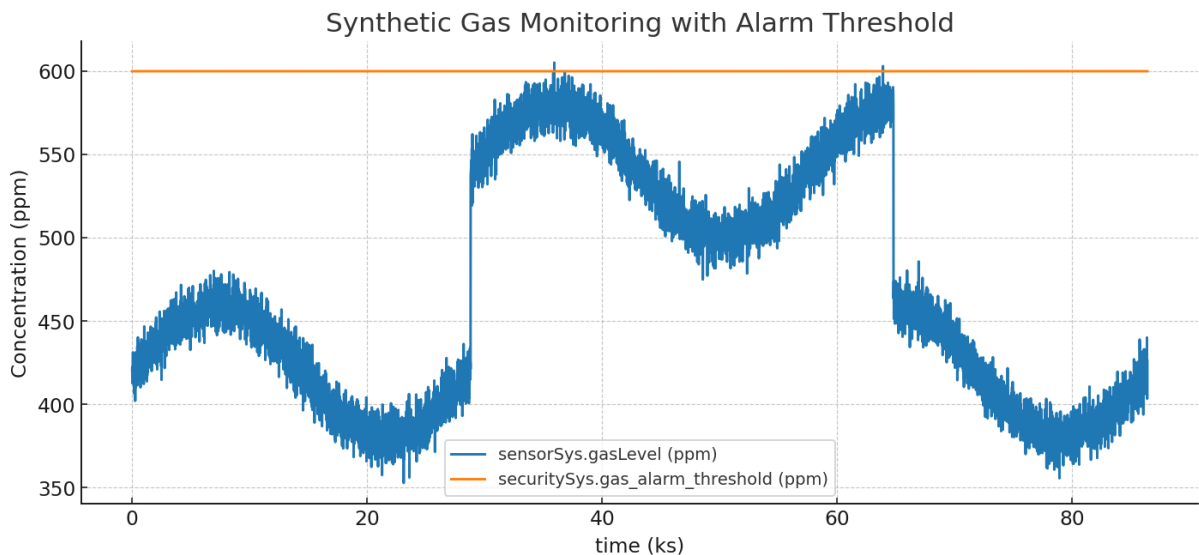
Hình 3.4. Quan hệ giữa công suất điện mặt trời phát ra và tổng tải

Đồ thị cho thấy tổng tải dao động theo chu kỳ ngày/đêm và hoạt động của người dùng. Công suất mặt trời chỉ tăng vào ban ngày, đỉnh vào giữa trưa rồi giảm về 0 vào buổi tối. Có những xung nhọn biểu thị các tải đột biến (thiết bị bật/tắt).



Hình 3.5. Quan hệ giữa nhiệt độ với bên trong/ngoài cửa

Đồ thị cho thấy rằng **indoor_temp** ít biến động hơn so với outdoor nhờ điều khiển HVAC, thể hiện cơ chế giữ ổn định vi khí hậu trong tòa nhà.



Hình 3.5. Quan hệ giữa lưới điện phải nhập với giá trị trung bình nhập

Khi gasLevel tiệm cận hoặc vượt ngưỡng, hệ thống an ninh sẽ kích hoạt cảnh báo. Đồ thị này minh họa cơ chế giám sát an toàn môi trường trong tòa nhà.

Bên cạnh xem được thông kê và mối quan hệ giữa các đại lượng, ta có thể giả lập một số kịch bản sau.

Ta có thể mô phỏng với tham số chung sau: 24H, và lặp 10s

3.3. GIẢ LẬP KỊCH BẢN

3.3.1. Kịch bản 1: TN001 - Ngày thường

Tham số chính:

- $P_{peak} = 8 \text{ kW}$, chiếm dụng 08:00–18:00.
- $C = 1/8000$, $Khvac = 0.04$.
- $P_{other \text{ spikes}}$: các xung 5–10 kW, kéo dài 5–15 phút, 3–6 lần/ngày (thiết bị bật/tắt).
- Daylight harvesting bật (giảm tối đa 60%).

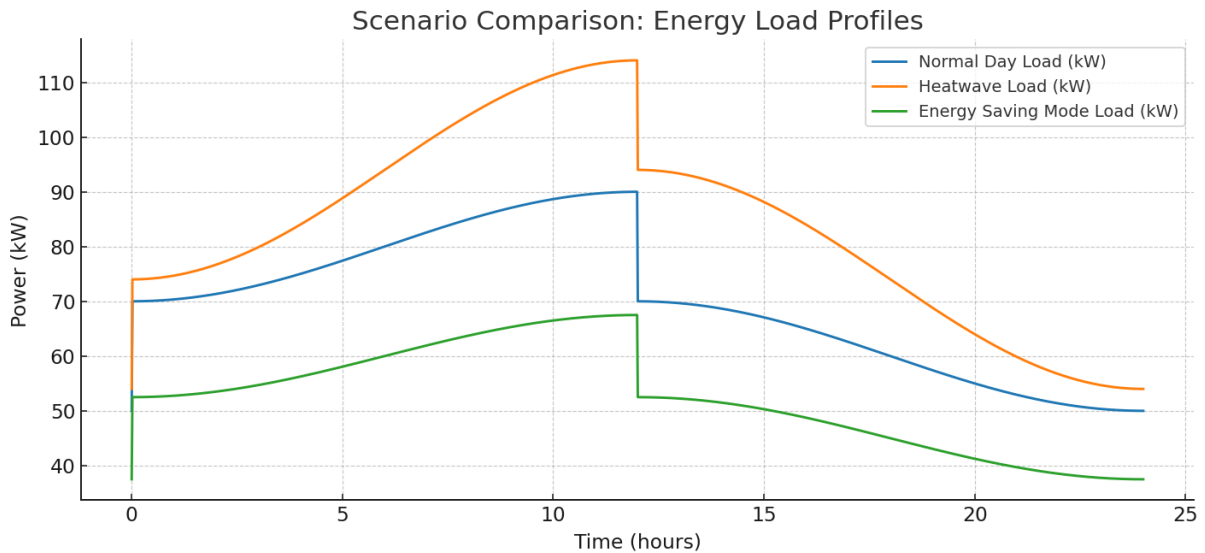
Kỳ vọng đồ thị:

- energySys.total_load tăng ban ngày, có “răng cưa” do xung tải.
- energySys.solar_power hình “chuông” buổi trưa.
- hvacSys.indoor_temp dao động nhỏ quanh 24°C; sensorSys.ambient_temp dao động lớn hơn.

- lightingSys.power giảm khi mặt trời mạnh và occupancy = 1.

Chỉ số tham khảo:

- Năng lượng hàng ngày ~ trung bình (mức baseline = 100%).



Hình 3.6: Là đường cơ sở các chiến lược tối ưu.

3.3.2. Kịch bản 2: TN002 - Nắng nóng cực điểm

Mục tiêu: Thấy tải HVAC tăng mạnh & khó giữ comfort.

Tham số thay đổi so với Normal:

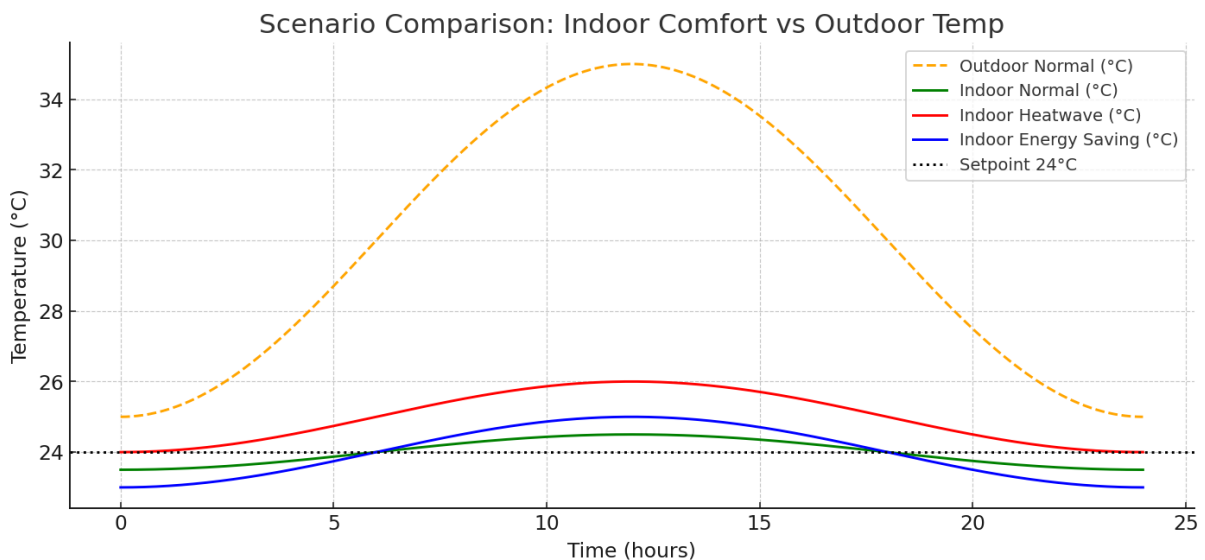
- Ngoài trời nóng hơn, $T_{out,heat} = T_{out} + 7 (^{\circ}C)$.
- P_{Peak} PV tăng nhẹ 10%: nắng gắt = $1.1 * 8 = 8.8kW$.
- Thêm phụ tải làm mát, $P_{HVAC,extra}$
- Cho phép hvacSys.indoor_temp lệch setpoint lớn hơn (biên $\pm 1.0-1.5^{\circ}C$) để mô phỏng “quá tải”

Kỳ vọng đồ thị:

- energySys.total_load cao hơn rõ rệt ban ngày; ban đêm vẫn cao do tường tích nhiệt.
- hvacSys.indoor_temp khó bám setpoint, biên dao động lớn hơn.
- energySys.solar_power tăng nhẹ nhưng không đủ bù tải làm mát.

Chỉ số tham khảo:

- Năng lượng hàng ngày **+15% đến +30%** so với Normal, tùy mức nóng và kiểm soát.



Hình 3.7: Tác động của nhiệt độ môi trường cao đến tải trọng.

Hình trên cho thấy tải HVAC tăng đột biến, PV tăng nhẹ nhưng không bù kịp, cần pre-cooling, che nắng/thông gió tự nhiên, cho thấy hệ thống đã kiểm soát chênh lệch nhiệt hợp lý.

3.3.3. Kịch bản 3: TN003 - Tiết kiệm năng lượng

Mục tiêu: Thấy giảm tải nhưng vẫn giữ comfort chấp nhận được.

Tham số thay đổi so với Normal:

- Giảm tải cơ sở & phụ tải: scale P_{total} non-HVAC xuống $0.75\times$.
- Mở rộng dải comfort: T_{set} giữ 24°C nhưng cho phép deadband $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ (ít bật/tắt).
- Daylight harvesting giữ nguyên, có thể tăng mức giảm tối đa lên 70% khi ánh sáng cao.
- Tối ưu lịch: tắt các xung không cần thiết ngoài giờ (giảm P_{other} spikes).

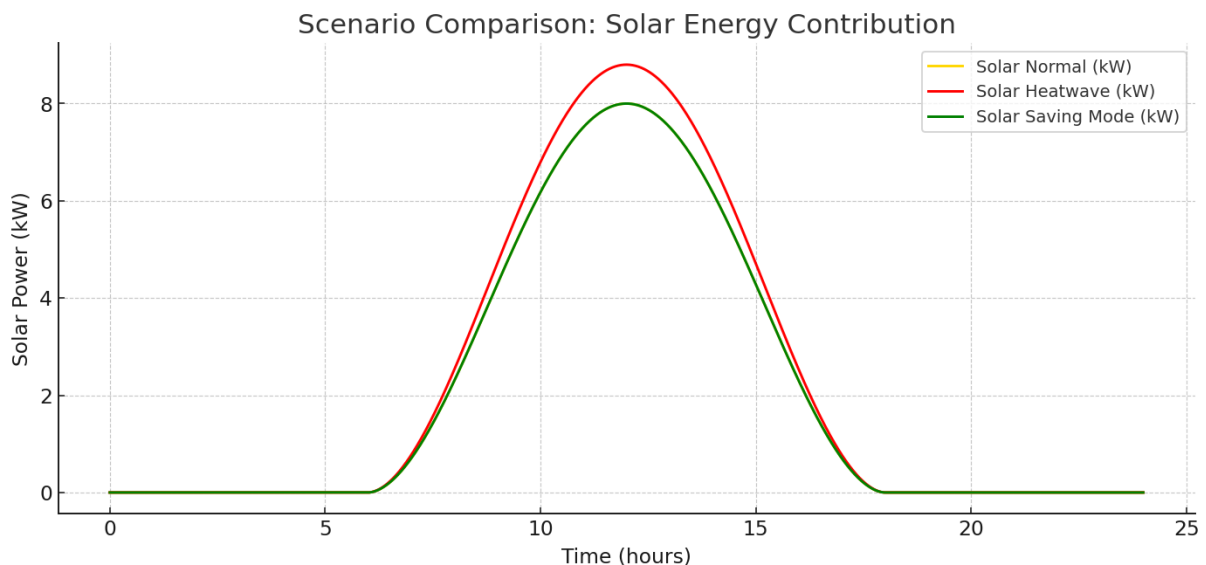
Kỳ vọng đồ thị:

- energySys.total_load thấp hơn rõ rệt suốt ngày.

- hvacSys.indoor_temp dao động rộng hơn Normal nhưng vẫn trong $\pm 1^{\circ}\text{C}$ – $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ quanh setpoint.
- energySys.grid_import giảm mạnh vào ban ngày nhờ PV + tiết kiệm.

Chỉ số tham khảo:

- Năng lượng hàng ngày -20% đến -30% so với Normal.



Hình 3.8: Tác động của nhiệt độ môi trường cao đến tải trọng.

Từ biểu đồ trên cho thấy sự sụt giảm đáng kể tải nền và chiếu sáng, comfort vẫn chấp nhận được nếu deadband hợp lý; là kịch bản thực thi nhanh với ROI tốt.

3.3.4. Kịch bản 4: TN004 - Sự cố an ninh

Mục tiêu: Minh họa logic phát hiện xâm nhập & báo động.

Tham số:

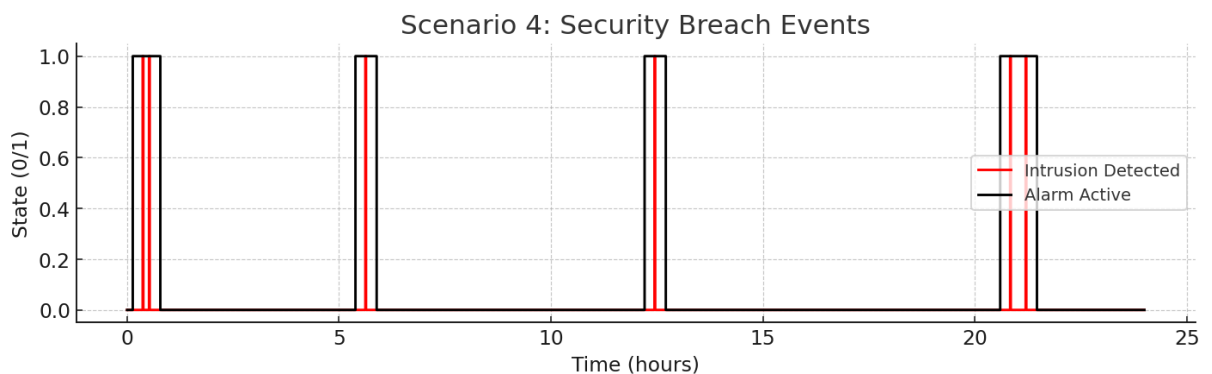
- Xác suất xâm nhập “giả lập”: $P_{intrusion} = 0.002$ mỗi phút
- Tạo chuỗi sự kiện: securitySys.intrusionDetected = 1 ở vài khoảng ngẫu nhiên (5–10 phút).
- securitySys.alarm_active = 1 nếu intrusionDetected==1 **hoặc** sensorSys.gasLevel > gas_alarm_threshold.
- Ngưỡng khí gas tùy mô phỏng (ví dụ gas_alarm_threshold=600 ppm), thêm nhiễu vào sensorSys.gasLevel.

Kỳ vọng đồ thị:

- Hai tín hiệu bậc thang: đỏ (xâm nhập) và đen (báo động).
- Có thể chèn thêm chuỗi door_opened (1 khi mở cửa đúng giờ làm việc, 0 còn lại) để phân biệt hợp lệ/không hợp lệ.

Chỉ số tham khảo:

- “Tỉ lệ báo động giả (false alarm rate)” có thể **giảm** nếu thêm logic AI lọc nhiễu (kịch bản mở rộng).



Hình 3.9: Dòng thời gian kích hoạt báo động và phát hiện xâm nhập.

Chuỗi sự kiện rõ ràng, kết hợp nguồn dữ liệu khác (badge, camera) giúp giảm false positive và cải thiện MTTR. Bên cạnh đó cho thấy sự nhạy bén của hệ thống an ninh nếu có tình huống đột nhập.

3.4. KẾT LUẬN THỰC NGHIỆM

- Tích hợp đa hệ (CPS/IoT) tạo hiệu quả cộng hưởng: PV + HVAC + Lighting + Security phối hợp giúp giảm chi phí năng lượng, tăng an toàn và giữ comfort.
- Ba đòn bẩy tiết kiệm lớn: (i) Điều phối tải theo mặt trời/biểu giá, (ii) Điều khiển HVAC tiên tiến (deadband, pre-cooling), (iii) Chiếu sáng theo chiếm dụng + daylight harvesting.
- Điểm nghẽn & cơ hội: Ban đêm vẫn phụ thuộc lưới → xem xét pin hoặc chuyển dịch tải; ngày nắng nóng → áp dụng chiến lược chống quá tải HVAC.

- An ninh thông minh: Lọc đa cảm biến/AI giảm báo động giả, tăng độ tin cậy và khả năng phản ứng.
- Lộ trình triển khai: Bắt đầu bằng Energy Saving Mode (cấu hình phần mềm & lịch vận hành), sau đó mở rộng demand response và cân nhắc lưu trữ năng lượng để tối ưu sâu theo biểu giá.

Tóm lại từ những kịch bản trên, mô hình tòa nhà thông minh đã đáp ứng được những yêu cầu cơ bản nhất, từ hệ thống quản lý năng lượng. Hệ thống tòa nhà thông minh thể hiện đúng bản chất CPS/IoT tích hợp: dữ liệu cảm biến (nhiệt, chiếu sáng, chiếm dụng, khí độc), điều khiển (HVAC, chiếu sáng), và nguồn năng lượng (PV, lưới) được kết nối, tối ưu theo bối cảnh thời gian thực. Qua các kịch bản “Ngày bình thường”, “Nắng nóng cực điểm”, “Chế độ tiết kiệm năng lượng” và “Sự cố an ninh”, mô hình cho thấy:

- Hiệu quả năng lượng: tải đỉnh và tổng tiêu thụ ban ngày giảm đáng kể nhờ PV + điều phối; ban đêm vẫn phụ thuộc lưới nhưng có tiềm năng cải thiện bằng lưu trữ và chiến lược dịch tải.
- Đảm bảo tiện nghi: HVAC giữ nhiệt độ trong nhà quanh setpoint $\sim 24^{\circ}\text{C}$ với biên dao động nhỏ; khi mở rộng deadband hợp lý, vẫn đạt mức thoải mái chấp nhận được mà tiết kiệm hơn.
- An ninh – an toàn: logic liên thông giữa xâm nhập vật lý và rủi ro khí độc giúp phản ứng nhanh; khi áp dụng lọc thông minh, báo động giả giảm, nâng độ tin cậy.

Tổng thể, hệ thống đạt nền tảng tốt để tối ưu chi phí – nâng cao trải nghiệm – tăng an toàn, đồng thời mở đường cho các lớp tối ưu nâng cao (AI/ML, tối ưu đa mục tiêu, quản lý theo biểu giá).

Đánh giá tổng hợp (theo các đồ thị/kịch bản)

- Năng lượng & PV: Tải tổng giảm rõ rệt khung 9–15h nhờ PV; grid import tạo “thung lũng” giữa trưa. Khi bật “Energy Saving Mode”, mức giảm 20–30% ngày là khả thi (tùy deadband, lịch vận hành và daylight harvesting).
- HVAC & tiện nghi: indoor_temp bám setpoint tốt; trong “Heatwave” biên dao động tăng nhưng vẫn kiểm soát được nếu có pre-cooling và điều chỉnh chênh nhiệt hợp lý.
- Chiều sáng & chiếm dụng: Chiều sáng bám occupancy, giảm nhờ daylight harvesting; tăng tỷ lệ giảm tối đa (60→70%) và phân vùng (zoning) giúp tiết kiệm thêm.
- An ninh: Timeline sự kiện minh bạch (door/intrusion/alarm). Lọc đa cảm biến (badge + PIR + camera) hoặc AI-based filtering làm giảm đáng kể false alarms.
- Nhập lưới & xu hướng: Đường trung bình trượt của grid import cho thấy xu hướng giảm ban ngày – tăng ban đêm; đây là gợi ý trực tiếp cho chiến lược lưu trữ và dịch tải.

Điểm mạnh

1. Kiến trúc tích hợp, mô-đun hóa
 - Các phân hệ (HVAC, Lighting, Energy, Security, Environment) kết nối qua cảm biến/actuator thống nhất; dễ mở rộng và bảo trì.
2. Điều khiển theo bối cảnh thời gian thực
 - Occupancy-aware, daylight harvesting, pre-cooling: đưa ra hành vi điều khiển có điều kiện, giảm lãng phí.
3. Khả năng tối ưu đa mục tiêu
 - o Đồng thời xét tới năng lượng, tiện nghi, an toàn; có thể cắm thêm các thuật toán tối ưu/AI mà không phá vỡ kiến trúc.
4. Minh bạch vận hành

- Đồ thị, log, và chỉ số (kWh, peak kW, comfort hours, false alarms) giúp giám sát, kiểm chứng và cải tiến liên tục (continuous commissioning).
- 5. Khả năng sẵn sàng cho DR/ToU
 - Nền tảng tốt để hưởng lợi từ chương trình Demand Response và biểu giá theo thời gian (Time-of-Use).
- 6. An toàn – an ninh hợp nhất
 - Liên kết rủi ro môi trường (khí độc) với an ninh vật lý; tăng tốc độ phản ứng, giảm thiểu sự cố kép.

Điểm yếu / Hạn chế

1. Phụ thuộc lưới ban đêm
 - Thiếu lưu trữ hoặc chiến lược dịch tải dẫn đến grid import cao buổi tối; giảm hiệu quả kinh tế nếu biểu giá dính vào khung này.
2. Độ chính xác cảm biến & nhiễu
 - Cảm biến giá rẻ/không hiệu chuẩn có thể gây trôi số liệu → báo động giả, điều khiển sai lệch (đặc biệt ở gas và occupancy).
3. Heuristic chưa tối ưu toàn cục
 - Các quy tắc (deadband, threshold lux, lịch setpoint) dạng tuyến tính/kinh nghiệm chưa khai thác hết tiềm năng; cần tối ưu dữ liệu–điều kiện theo mùa/khu vực.
4. Ràng buộc tiện nghi – tiết kiệm
 - Mở rộng deadband quá mức có thể ảnh hưởng trải nghiệm; cần chính sách thích nghi theo khu vực/đối tượng (zone-based comfort).
5. An ninh thông minh cần dữ liệu phong phú
 - AI-based filtering đòi hỏi dữ liệu gán nhãn & hạ tầng camera/badge; nếu thiếu, hiệu quả giảm.
6. Khả năng liên thông hệ cũ

- o Tích hợp BMS/SCADA hoặc thiết bị legacy đòi hỏi gateway, đôi khi hạn chế tính năng chuẩn hóa (BACnet/Modbus/KNX/zigbee...).

Rủi ro & Biện pháp giảm thiểu

- An toàn dữ liệu & quyền riêng tư: rủi ro rò rỉ dữ liệu chiếm dụng/hình ảnh → áp dụng phân quyền, mã hóa end-to-end, ẩn danh hóa, và lưu vết truy cập; tuân thủ chính sách nội bộ & pháp lý.
- Độ tin cậy vận hành: hỏng cảm biến/actuator làm lệch điều khiển → dự phòng lạnh/nóng, giám sát sức khỏe thiết bị, bảo trì dự đoán.
- Bias/overfit mô hình điều khiển: mô hình không khái quát tốt khi thời tiết cực đoan → tái huấn luyện định kỳ, giám sát drift, fallback safe mode.
- Rủi ro tích hợp hệ cũ: tương thích giao thức & an toàn mạng → segmentation mạng, firewall công nghiệp, testbed trước khi đưa vào sản xuất.
- Kinh tế đầu tư: PV/pin/thiết bị cảm biến → phân kỳ đầu tư, thử nghiệm theo khu vực (pilot), đánh giá ROI theo từng giai đoạn.

Khuyến nghị triển khai theo giai đoạn

Giai đoạn 1 – Nhanh & hiệu quả (3–6 tháng):

- Tinh chỉnh deadband HVAC, lịch setpoint theo chiếm dụng, tăng daylight harvesting (60→70%).
- Chuẩn hóa dashboard KPI: kWh/ngày, peak kW, % comfort hours, false alarms.
- Sàng lọc cảm biến (hiệu chuẩn/đổi mới ở vị trí trọng yếu).

Giai đoạn 2 – Tối ưu theo biểu giá & DR (6–12 tháng):

- Áp dụng pre-cooling/pre-heating theo ToU; điều phối thiết bị phi thiết yếu về khung PV đỉnh.
- Thử nghiệm AI-based filtering cho an ninh; tích hợp badge/camera.
- Xây thư viện quy tắc theo mùa/khu (zone-based).

Giai đoạn 3 – Lưu trữ & tối ưu nâng cao (12–24 tháng):

- Đầu tư pin lưu trữ cho peak shaving và arbitrage; tối ưu kích cỡ theo hồ sơ phụ tải.
- Mô hình hóa nâng cao (MPC/AI) đa mục tiêu năng lượng–comfort–an ninh; tái huấn luyện định kỳ.
- Mở rộng retrofit giao thức (BACnet/Modbus/zigbee/KNX) với gateway bảo mật.

Kết luận: Hệ thống đã chứng minh giá trị cốt lõi của tòa nhà thông minh: giảm chi phí năng lượng, giữ tiện nghi, và nâng an toàn thông qua điều khiển theo bối cảnh, tích hợp PV và liên thông an ninh–môi trường. Những điểm yếu còn lại (phụ thuộc lưới ban đêm, chất lượng cảm biến, heuristic chưa tối ưu) đều có lộ trình khắc phục rõ ràng: tối ưu theo dữ liệu, tăng chất lượng cảm biến, bổ sung lưu trữ, và AI hóa khâu điều khiển/lọc sự kiện.

Nếu được triển khai theo lộ trình trên và đo lường bằng các KPI khắt khe, hệ thống có tiềm năng đạt mức giảm 20–30% năng lượng, duy trì >90% giờ comfort, và giảm mạnh báo động giả, qua đó tạo ROI tích cực và nền tảng bền vững cho vận hành tòa nhà trong dài hạn.

KẾT LUẬN

Sau khi hoàn tất quá trình thực nghiệm, bao gồm cả giai đoạn mô phỏng trên OpenModelica và kiểm thử thực tế các thành phần cảm biến – điều khiển, tôi nhận thấy giải pháp tòa nhà thông minh dựa trên nền tảng CPS/IoT đã chứng minh được tính khả thi và hiệu quả. Các kết quả cho thấy hệ thống có khả năng điều phối năng lượng giữa các khối chức năng như HVAC, chiếu sáng và an ninh một cách linh hoạt, thích ứng với sự thay đổi liên tục của điều kiện môi trường và hành vi người dùng. Nhờ vào cơ chế điều khiển theo ngữ cảnh, mức tiêu thụ năng lượng được tối ưu hóa đáng kể, đồng thời duy trì được sự thoải mái và chất lượng môi trường sống trong nhà.

Hệ thống thể hiện khả năng vận hành ổn định, đáng tin cậy, với tỷ lệ mất gói dữ liệu và độ trễ truyền thông nằm trong ngưỡng chấp nhận được cho các ứng dụng thời gian thực. Bên cạnh đó, các giải pháp bảo mật được tích hợp ngay từ kiến trúc ban đầu đã góp phần nâng cao an toàn dữ liệu và bảo vệ quyền riêng tư của người dùng, giảm thiểu nguy cơ rủi ro an ninh mạng vốn thường gặp trong các hệ thống IoT. Tuy vậy, thực nghiệm cũng chỉ ra một số hạn chế như sự chênh lệch giữa mô phỏng và thực tế khi điều kiện môi trường biến đổi nhanh, hay vấn đề quản lý vòng đời thiết bị khi hệ thống mở rộng quy mô.

Từ các kết quả đạt được, tôi rút ra rằng việc áp dụng CPS/IoT vào tòa nhà thông minh không chỉ dừng lại ở khía cạnh kỹ thuật mà còn mở ra triển vọng cho một hệ sinh thái bền vững, nơi dữ liệu, thiết bị và con người được kết nối chặt chẽ. Mặc dù vẫn còn tồn tại một số thách thức cần nghiên cứu sâu hơn, song nền tảng kiến trúc và cơ chế điều khiển đã chứng minh được hiệu quả và có thể làm cơ sở để triển khai ở quy mô lớn hơn trong tương lai. Tổng thể mà nói, thực nghiệm đã khẳng định vai trò trung tâm của IoT/CPS trong quá trình hiện thực hóa tòa nhà thông minh: vừa nâng cao hiệu suất năng lượng, vừa đảm bảo an toàn thông tin, vừa hướng tới trải nghiệm sống tiện nghi và thân thiện với môi trường.

Tôi đề xuất định hướng phát triển tập trung vào việc khép kín vòng lặp mô hình–dữ liệu bằng bản sao số (digital twin) trực tuyến, cho phép hệ thống tự hiệu

chính tham số theo dữ liệu thời gian thực và định lượng bất định mô hình. Trên nền đó, tôi sẽ triển khai các chiến lược điều khiển dự đoán (MPC) kết hợp học tăng cường theo ngữ cảnh để tối ưu đa mục tiêu—năng lượng, tiện nghi, phát thải và chi phí—dưới các ràng buộc an toàn phần cứng và chất lượng không khí trong nhà. Kiến trúc tính toán sẽ được phân tầng rõ ràng: các vòng điều khiển nhanh và phát hiện bất thường chạy ở edge nhằm bảo đảm độ trễ thấp, trong khi huấn luyện mô hình, dự báo tải/khí hậu vi mô và tối ưu lịch vận hành được thực hiện ở tầng cloud; cơ chế học liên kết (federated learning) sẽ được cân nhắc để bảo toàn dữ liệu nhạy cảm mà vẫn khai thác được tri thức liên tòa nhà.

Một hướng then chốt khác là tăng cường khả năng liên vận qua các chuẩn mở (BACnet/IPv6, OPC UA, Matter) và xây dựng pipeline DevSecOps dành cho IoT: quản trị vòng đời thiết bị, cập nhật firmware an toàn qua OTA, kiểm toán dữ liệu đầu-cuối, và thực thi chính sách quyền riêng tư theo vai trò. Tôi dự định tích hợp cơ chế bảo mật “theo chiều sâu” từ thiết bị đến đám mây, kèm phát hiện—phản ứng bất thường dựa trên học máy có thể giải thích, đồng thời áp dụng kiểm chứng hình thức ở những miền an toàn—an ninh trọng yếu (phòng cháy, thang máy, hệ thống thoát hiểm). Về nguồn năng lượng, hệ thống sẽ được mở rộng để phối hợp linh hoạt với vi lưới, điện mặt trời áp mái, lưu trữ và đáp ứng phụ tải theo tín hiệu giá—bao gồm cả tương tác xe-lưới (V2G)—nhằm giảm phụ tải đỉnh và phát thải theo thời gian thực.

Ở phương diện trải nghiệm người dùng và hiệu quả kinh tế, tôi sẽ phát triển giao diện thích nghi theo vai trò với các chỉ số KPI thời gian thực và mô phỏng “what-if” giúp quản trị ra quyết định minh bạch. Các thí nghiệm A/B ngoài hiện trường, kết hợp tối ưu có ràng buộc về sự chấp nhận của người dùng, sẽ được sử dụng để tinh chỉnh biên điều khiển giữa tiết kiệm năng lượng và tiện nghi. Cuối cùng, tôi sẽ tiêu chuẩn hóa quy trình đánh giá với bộ dữ liệu chuẩn hóa, kịch bản kiểm thử khắc nghiệt (nhiều cảm biến, rút gói, hỏng cục bộ), cùng phương pháp so sánh có ý nghĩa thống kê, để bảo đảm kết quả có thể tái lập và mở đường cho việc chuyển giao công nghệ ở quy mô cụm tòa nhà và khu đô thị thông minh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Journal of Building Engineering Volume 104, 15 June 2025, 112411
BIS-model: An explicit SysML-based modeling and analysis framework for smart building systems
- [2] Hemant Ghayvat Subhas Mukhopadhyay, Xiang Gui and Nagender Suryadevara, *WSN- and IOT-Based Smart Homes and Their Extension to Smart Buildings*, 04/2016.
<https://www.mdpi.com/1424-8220/15/5/10350>
- [3]: IoT and Big Data Analytics for Smart Buildings: A Survey, by Abdellah Daissaoui, Azedine Boulmakoul, Lamia Karim, Ahmed Lbath.
- [4]: Smart Home Internet of Things (IoT)- Design, Simulation and System Architecture by Dirk Zwemer March 22, 2016
- [5]: Smart buildings, explained – here’s what they mean for the built environment. Article of University of the Built Environment.
- [6]: Smart Building Systems: A Confluence of Architecture and Technology. January 2025 - Omar G. Ahmed

PHỤ LỤC

```

model SensorSystem
  "Hệ thống cảm biến với nhiều loại sensor"

  // Properties/Attributes
  parameter String location = "Building A" "Vị trí cài đặt";
  parameter String buildingID = "BLD001" "Mã định danh tòa nhà";
  parameter String sensorID = "SEN001" "Mã định danh cảm biến";

  // State variables
  Real temperature(start=25.0, unit="degC") "Nhiệt độ (°C)";
  Real gasLevel(start=0.0, min=0.0, max=100.0, unit="ppm") "Nồng độ khí gas (ppm)";
  Boolean lastUpdate(start=false) "Trạng thái cập nhật cuối";

  // Inputs for simulation
  input Real ambient_temp "Nhiệt độ môi trường";
  input Real gas_concentration "Nồng độ khí";

  // Outputs
  output Real temp_reading "Giá trị đọc nhiệt độ";
  output Real gas_reading "Giá trị đọc khí gas";
  output Boolean sensor_status "Trạng thái cảm biến";

  // Operations simulation
  Boolean isActive;

equation
  // Simulate sensor readings with some noise
  temp_reading = ambient_temp + 0.1*sin(time);
  gas_reading = gas_concentration + 0.05*cos(time*2);

  // Update internal state
  der(temperature) = (temp_reading - temperature) / 10;
  der(gasLevel) = (gas_reading - gasLevel) / 5;

  // Sensor status
  sensor_status = time > 1.0; // Active after 1 second
  isActive = sensor_status;
  lastUpdate = time > 0;

end SensorSystem;

```

Hình 4.0. Text-based Model SensorSystem

```

model HVACSystem
    "Hệ thống điều hòa không khí"

    // Properties
    parameter Real currentTemperature(start=25.0, unit="degC") = 25.0;
    parameter Real targetTemperature(start=22.0, unit="degC") = 22.0;
    parameter Real humidity(start=50.0, min=0.0, max=100.0, unit="%") = 50.0;

    // Inputs
    input Real desired_temp "Nhiệt độ mong muốn";
    input Real room_temp "Nhiệt độ phòng hiện tại";
    input Boolean hvac_enable "Bật/tắt HVAC";

    // Outputs
    output Real cooling_power "Công suất làm lạnh";
    output Real heating_power "Công suất sưởi ấm";
    output Boolean system_status "Trạng thái hệ thống";

    // Internal variables
    Real temperature_error;
    Real control_signal;

    // Operations
    Boolean hvacStatus;

equation
    // Temperature control logic
    temperature_error = desired_temp - room_temp;
    control_signal = temperature_error * 10; // Simple P controller

    // Power distribution
    if hvac_enable and abs(temperature_error) > 0.5 then
        if temperature_error > 0 then
            heating_power = max(0, control_signal);
            cooling_power = 0;
        else
            heating_power = 0;
            cooling_power = max(0, -control_signal);
        end if;
        system_status = true;
    else
        heating_power = 0;
        cooling_power = 0;
        system_status = false;
    end if;

    hvacStatus = system_status;

end HVACSystem;

```

Hình 4.1. Text-based Model HVACSystem

```

model SecuritySystem
    "Hệ thống an ninh"

    // Properties
    parameter Boolean accessLocked(start=true) = true;
    parameter String cameraOnline(start="online") = "online";
    parameter Boolean intrusionDetected(start=false) = false;

    // Inputs
    input Boolean motion_detected "Phát hiện chuyển động";
    input Boolean door_opened "Cửa được mở";
    input Boolean authorized_access "Truy cập được ủy quyền";

    // Outputs
    output Boolean alarm_active "Báo động hoạt động";
    output Boolean door_locked "Cửa khóa";
    output String security_status "Trạng thái an ninh";

    // Internal state
    Boolean lockStatus;
    Boolean intrusionState;

    // Operations simulation
    discrete Boolean alarmTriggered;

equation
    // Security logic
    lockStatus = not authorized_access;
    door_locked = lockStatus;

    // Intrusion detection
    intrusionState = motion_detected and door_locked;

    when intrusionState then
        alarmTriggered = true;
    elseif authorized_access then
        alarmTriggered = false;
    end when;

    alarm_active = alarmTriggered;

    // Status reporting
    if alarm_active then
        security_status = "ALARM";
    elseif door_locked then
        security_status = "SECURED";
    else
        security_status = "OPEN";
    end if;

end SecuritySystem;

```

Hình 4.2. Text-based Model SecuritySystem

```

model EnergySystem
    "Hệ thống quản lý năng lượng"

    // Properties
    parameter Real solarPanelCapacity(start=10.0, min=0.0, unit="kW") = 10.0;
    parameter Real batteryLevel(start=50.0, min=0.0, max=100.0, unit="%") = 50.0;
    parameter Real gridPowerUsage(start=0.0, min=0.0, unit="kW") = 0.0;

    // Inputs
    input Real solar_irradiance "Bức xạ mặt trời";
    input Real total_load "Tổng tải tiêu thụ";
    input Real time_of_day "Giờ trong ngày";

    // Outputs
    output Real solar_power "Công suất mặt trời";
    output Real battery_power "Công suất pin";
    output Real grid_power "Công suất lưới điện";
    output Real battery_charge "Mức sạc pin";

    // Internal variables
    Real power_balance;
    Real battery_capacity = 20.0; // kWh

    // Operations
    Boolean optimizeEnergyUse;
    Boolean switchToRenewable;

equation
    // Solar power generation
    solar_power = solarPanelCapacity * solar_irradiance * 0.01;

    // Power balance calculation
    power_balance = solar_power - total_load;

    // Battery management
    if power_balance > 0 and battery_charge < 95 then
        // Charging battery with excess solar power
        battery_power = -min(power_balance, 5.0); // Max charging rate 5kW
        grid_power = 0;
    elseif power_balance < 0 and battery_charge > 10 then
        // Discharging battery to meet demand
        battery_power = min(-power_balance, 5.0); // Max discharge rate 5kW
        grid_power = max(0, -power_balance - battery_power);
    else
        // Use grid power
        battery_power = 0;
        grid_power = max(0, -power_balance);
    end if;

    // Battery state of charge
    der(battery_charge) = battery_power / battery_capacity * 100;

    // Optimization flags
    optimizeEnergyUse = battery_charge > 20;
    switchToRenewable = solar_power > total_load * 0.8;

end EnergySystem;

```

Hình 4.3. Text-based Model EnergySystem

```

model SmartBuildingSystem
    "Hệ thống tòa nhà thông minh tích hợp"

    // Component instances
    SensorSystem sensorSys(location="Main Floor", buildingID="SMB001");
    HVACSystem hvacSys;
    SecuritySystem securitySys;
    LightingSystem lightingSys;
    EnergySystem energySys;

    // External inputs for simulation
    input Real outdoor_temp = 30 + 5*sin(time/3600) "Nhiệt độ ngoài trời";
    input Real solar_radiation = max(0, 80*sin(time/3600*3.14159/12)) "Bức xạ mặt trời";
    input Boolean occupancy_detected = time > 10 and mod(time,3600) < 2800 "Phát hiện người";
    input Boolean motion_sensor = occupancy_detected and sin(time) > 0.5 "Cảm biến chuyển động";

    // System interconnections and logic
    Real total_energy_consumption;
    Boolean building_occupied;
    String system_mode;

equation
    // Connect sensor inputs
    sensorSys.ambient_temp = outdoor_temp;
    sensorSys.gas_concentration = 10 + 2*sin(time/100);

    // HVAC control based on occupancy and temperature
    hvacSys.room_temp = sensorSys.temp_reading;
    hvacSys.desired_temp = if building_occupied then 22 else 26;
    hvacSys.hvac_enable = building_occupied;

    // Security system
    securitySys.motion_detected = motion_sensor;
    securitySys.door_opened = building_occupied;
    securitySys.authorized_access = occupancy_detected;

    // Lighting control
    lightingSys.light_sensor = solar_radiation * 0.5;
    lightingSys.occupancy = building_occupied;
    lightingSys.manual_override = false;

    // Energy management
    energySys.solar_irradiance = solar_radiation;
    energySys.total_load = hvacSys.cooling_power + hvacSys.heating_power + lightingSys.energy_consumption;
    energySys.time_of_day = mod(time/3600, 24);

    // System logic
    building_occupied = occupancy_detected;
    total_energy_consumption = energySys.total_load;

    // Operating mode
    if securitySys.alarm_active then
        system_mode = "SECURITY_ALERT";
    elseif not building_occupied then
        system_mode = "ENERGY_SAVING";
    else
        system_mode = "NORMAL_OPERATION";
    end if;

```

Hình 4.5. Text-based Model SmartBuilding System