



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Campus del Baix Llobregat

Proposta d'automatització d'un digester anaerobi experimental

Treball de Final de Grau

Grau d'Enginyeria en Sistemes Biològics

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona

**Autora: Cristina B. Vega López
Tutor: Marcos Quílez Figuerola**

Setembre 2020

Sumari

Índex de figures.....	4
Índex de taules.....	5
Glossari d'acrònims.....	6
Resum.....	8
Abstract.....	9
1. Introducció.....	10
2. Objectius.....	11
3. Estudi previ.....	12
3.1 Obtenció de biogàs.....	12
3.1.1 Producció de biogàs.....	13
3.1.2 Digestió anaeròbia i codigestió.....	14
3.2 Paràmetres ambientals.....	18
3.2.1 pH.....	18
3.2.2 Alcalinitat.....	18
3.2.3 Potencial redox (ORP).....	19
3.2.4 Nutrients.....	19
3.2.5 Tòxics i inhibidors.....	20
3.3 Paràmetres operacionals.....	21
3.3.1 Temperatura.....	21
3.3.2 Agitació.....	22
3.3.3 Temps de retenció hidràulic i cel·lular (TRH i TRC).....	22
3.3.4 Velocitat de càrrega orgànica (OLR).....	23
3.4 Digestors anaerobis.....	23
3.4.1 Reactor de mescla completa sense recirculació.....	24
3.4.2 Reactor de mescla completa amb recirculació.....	25
3.4.3 Reactor amb retenció de biomassa sense recirculació.....	25
3.4.4 Sistemes discontinus.....	26
3.4.5 Sistemes de dues etapes.....	26
3.4.6 Sistemes de dues fases.....	27
3.5 Automatització de bioreactors.....	28

3.5.1 Sistemes SCADA	29
4. Materials i mètodes	42
4.1 Materials	42
4.1.1 RTU: PLC basada en Arduino	42
4.1.2 HMI: Ordinador portàtil amb Labview	43
4.1.3 Sensors	44
4.1.4 Relés	51
4.1.5 Actuadors	53
4.1.6 Font d'alimentació	55
4.1.7 Altres elements	55
4.2 Mètodes	57
4.2.1 Especificacions funcionals	57
4.2.2 Diagrama i simplificació del procés	58
4.2.3 Muntatge de l'armari elèctric	59
4.2.4 Programació	60
4.2.5 Disseny d'un gasòmetre amb Arduino	62
5. Resultats i discussió.....	63
6. Conclusions	65
7. Annexos.....	66
Annex 1. Softwares de mercat per a sistemes SCADA	66
Annex 2. Diagrama de grafcet del procés	68
Annex 3. Esquema de muntatge del sistema.....	69
Annex 4. Codi informàtic PLC.....	70
8. Referències.....	71

Índex de figures

Figura 1. Flux de DQO (Demanda Química d'Oxigen) en el procés de digestió anaeròbia.....	14
Figura 2. Fases de la digestió anaeròbia i productes intermedis.....	17
Figura 3. Elements usuals en un digestor CSTR	23
Figura 4. Tipus de bioreactors de biomassa suspesa.....	24
Figura 5. Tipus de bioreactors de biomassa immobilitzada o fixada	26
Figura 6. Sistema de dues etapes: Hidròlisis i filtre percolador.....	27
Figura 7. Sistema de dues fases que separa l'acidogènesis de la metanogènesis.....	28
Figura 8. Exemple d'automatització per optimitzar la velocitat de càrrega orgànica	29
Figura 9. Diagrama representatiu dels sistemes SCADA a la Indústria 4.0.....	31
Figura 10. Representació esquemàtica dels mòduls d'un PLC.....	36
Figura 11. Connector RS-232C	39
Figura 12. Connexió del sensor de temperatura DS18B20 a la PLC basada en Arduino	45
Figura 13. Connexió de la sonda SEN0165 Analog ORP Meter a la PLC basada en Arduino	47
Figura 14. Cabalímetre YF-S201 de la marca Sabdon 1-30L/min.....	47
Figura 15. Connexió del cabalímetre YF-S201 a la PLC basada en Arduino	49
Figura 16. Esquema d'aplicació del sensor de nivell XKC-I25-T12V.....	50
Figura 17. Connexió del sensor de nivell XKC-I25-T12V a la PLC basada en Arduino	50
Figura 18. Parts d'un relé electromagnètic.....	51
Figura 19. Mòdul de 8 relès de la marca Selektion	52
Figura 20. Connexió del relé a la PLC basada en Arduino.....	53
Figura 21. Bomba De Agua Sumergible 12V 3M 240L/H	53

Figura 22. Connexió de la bomba peristàltica a la PLC basada en Arduino	54
Figura 23. Esquema de funcionament d'un relé electromagnètic.....	54
Figura 24. Font d'alimentació de 24 V amb adaptació a carril DIN	55
Figura 25. Elements elèctrics sostinguts a un carril DIN	55
Figura 26. Interruptor general amb adaptació a carril DIN.....	56
Figura 27. Connector de xarxa amb tapa protectora.....	57
Figura 28. Muntatge teòric de l'armari de connexions elèctriques	¡Error! Marcador no definido.
Figura 29. Placa Elegoo amb el muntatge simplificat del procés del digestor.	60
Figura 30. Proposta d'interfície d'usuari.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 31. Tub de Mariotte amb elèctrodes i multímetre per mesurar la tensió.....	62

Índex de taules

Taula 1. Requeriments de pretractament.....	13
Taula 2. Nivell d'instrumentació de digestors anaerobis.....	41
Taula 3. Rang de tensions en entrades i sortides digitals i analògiques.....	43
Taula 4. Especificacions tècniques de 3 models de cabalímetre diferents.....	48

Glossari d'acrònims

GEH	Gasos d'Efecte Hivernacle
IRTA	Institut de Recerca Tecnològica Agroalimentària
GIRO	Gestió Integral de Residus Orgànics
EEABB	Escola d'Enginyeria Agroalimentària i de Biosistemes de Barcelona
DQO	Demanda Química d'Oxigen
HPr	Àcid propiònic
HBu	Àcid butíric
HVal	Àcid Valèric
AgCl	Àcids grassos de cadena llarga
C/N	Relació Carboni/Nitrogen
FORM	Fracció Orgànica de Residus Municipals
AGVs	Àcids Grassos Volàtils
ORP	Oxidation Reduction Potencial
NIR	Near Infrared
FTIR	Fourier Transform Infrared
TRH	Temps de Retenció Hidràulic
TRC	Temps de Retenció Cel·lular
ISAT	Information and Advisory Service on Appropriate Technology
OLR	Organic Loading Rate
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
DSFF	Downflow Stationary Fixed Film
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition

PLC	Programmable Logic Controller
RTU	Remote Terminal Unit
MTU	Maximum Transmission Unit
CPU	Central Processing Unit
HMI	Human-Machine Interface
PID	Proportional–Integral–Derivative (controller)
FBD	Function Block Diagram
CFE	Communication Front End
VHF	Very High Frequency
UHF	Ultra High Frequency
SD	Secure Digital
I ² C	Inter Integrated Circuits
GND	Ground – Connexió a terra
DIN	Deutsches Institut für Normung (va publicar les especificacions originals del carril)
PCR	Polymerase Chain Reaction
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
NO	Normally Open
NC	Normally Closed
IDE	Integrated Development Environment
SST	Sòlids Suspesos Totals

Resum

Degut al moment digital en el que ens trobem, cada vegada és més habitual implementar tecnologia en la supervisió i el control de processos biològics per diferents motius, com per exemple: optimització, crear històrics de producció o alliberar l'operari de càrrega de feina. La digestió anaeròbia destaca com a bioprocés per l'obtenció d'un recurs energètic, el biogàs, a partir de l'aprofitament de gairebé qualsevol tipus de residu orgànic. L'automatització de bioreactors anaerobis industrials és cada vegada més freqüent, però també ha anat evolucionant l'automatització de bioreactors experimentals. A nivell de laboratori sovint es poden emprar sistemes d'automatització més variats i assequibles, ja que normalment no requereixen de solucions tecnològiques sofisticades. És per aquest motiu que en aquest treball de fi de grau es realitza un estudi exhaustiu dels diferents bioreactors experimentals i dels components que integren un sistema de supervisió i/o control. En última instància es presenta un exemple de disseny flexible amb la finalitat d'agrupar solucions adients de mercat actual per automatitzar un bioreactor experimental tipus batch que actualment es troba a les instal·lacions de l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentària.

Paraules Clau:

Arduino, automatització, bioinstrumentació, bioprocessos, bioreactors, biotecnologia, control, digestió anaeròbia, digestors, electrònica, LabView, PLC, supervisió.

Abstract

Due to the digital moment in which we find ourselves, it is increasingly common to implement technology in the monitoring and control of biological processes for different reasons, such as optimization, creating production records or releasing the workload operator. Anaerobic digestion stands out as a bioprocess for obtaining an energy resource, biogas, from the use of almost any type of organic waste. The automation of industrial anaerobic bioreactors is becoming more frequent, but the automation of experimental bioreactors has also evolved. At the laboratory level, more varied and affordable automation systems can often be used, as they do not normally require sophisticated technological solutions. It is for this reason that in this final project a thorough study is carried out of the different experimental bioreactors and the components that make up a system of supervision and/or control. Ultimately, an example of flexible design is presented in order to group suitable current market solutions to automate an experimental batch-type bioreactor that is currently located in the facilities of the Institute of Agri-Food Research and Technology.

Keywords:

Arduino, automation, bioinstrumentation, bioprocesses, bioreactors, biotechnology, anaerobic digestion, control, digesters, electronics, LabView, PLC, supervision.

1. Introducció

La lliure descomposició de residus orgànics als abocadors allibera grans quantitats de metà i diòxid de carboni que s'escapen a l'atmosfera i contaminen el medi ambient (Zhu et al., 2009). En condicions controlades, el mateix procés pot proporcionar productes útils com ara biocombustibles i fertilitzants. Gairebé qualsevol residu orgànic es pot transformar en aquests productes mitjançant la descomposició de la matèria orgànica en absència d'oxigen o nitrats mitjançant l'acció dels propis microorganismes, produint un gas combustible amb una alta proporció de metà (al voltant del 60%). El biogàs resultant s'aprofita com a combustible en motors, turbines o calderes, ja sigui sòl o mesclat amb altres combustibles (Yu i Huang, 2009; Lesteur et al., 2010).

Hi ha diversos mètodes disponibles per al tractament de residus orgànics, però la digestió anaeròbia és un dels més idonis per a la reducció de gasos d'efecte hivernacle (GEH), revalorització de residus orgànics i la millora com a fertilitzant dels productes tractats (Lee et al., 2009c) a més de no requerir un subministrament d'oxigen (Chanakya et al., 2007; Guermoud et al., 2009). Es pot dur a terme amb diferents tipus de residus, com per exemple residus d'estacions depuradores d'aigües residuals, aigües residuals municipals i industrials, residus agrícoles i ramaders o fracció orgànica de residus urbans. També es tracta d'una solució per eliminar les males olors dels residus orgànics, així com una tecnologia d'utilitat ambiental ja que redueix els GEH derivats de la reducció d'emissions incontrolades de metà (sent aquest 20 vegades més contaminant que el diòxid de carboni) (De Baere, 2006; Jingura i Matengaifa, 2009).

En definitiva, la digestió anaeròbia pot resultar de gran interès econòmic i mediambiental sempre que s'aconsegueixi produir suficient quantitat de producte. És per aquest motiu que un ampli ventall d'investigadors treballen actualment per desenvolupar tractaments cada vegada més òptims. OPRENAC és un projecte de recerca coparticipat per la UPC i l'IRTA orientat a l'optimització de bioreactors de digestió anaeròbia. Una de les millores que pretén assolir el programa consisteix en implementar un sistema d'automatització que permeti fer un estudi de l'evolució del procés. En primera instància, això permet alliberar l'operari de laboratori de feines repetitives i de la supervisió constant, però si el sistema de control es suficientment versàtil com per poder ampliar les seves prestacions, es pot aconseguir que el

bioreactor operi de manera totalment autònoma i eficient. Aquest treball es realitza en el context d'aquest projecte.

2.Objectius

El desenvolupament d'aquest treball final de grau s'ha vist afectat i limitat per la situació excepcional de confinament per COVID-19. Aquesta circumstància ha fet necessari reformular els objectius inicials per adaptar-los a les possibilitats imposades per aquesta situació.

Inicialment s'havia plantejat replicar un bioreactor ja operatiu millorant alguns aspectes de fiabilitat del seu funcionament. Aquest bioreactor es troba operatiu a les instal·lacions de l'IRTA a la Torre Marimon (Caldes de Montbui) i la seva automatització va ser objecte d'un treball final de màster (Camarasa, 2019). L'objectiu inicial consistia en analitzar el funcionament del bioreactor per identificar els aspectes que calia millorar i, seguidament, posar en marxa un nou reactor amb un sistema d'automatització nou que donés solució als problemes identificats.

La situació de confinament va impedir l'accés al bioreactor que calia operar i observar. Així mateix també va impedir l'accés al laboratori de la UPC on calia desenvolupar el nou sistema de control i automatització.

En aquestes circumstàncies, i seguint les indicacions generals de la direcció de l'ESAB sobre els TFG afectats per la situació de tancament dels laboratoris, es van redefinir els objectius per plantejar un treball amb una orientació més teòrica. Per aquest motiu, es va substituir l'anàlisi del bioreactor operatiu a la Torre Marimon per un estudi més complet dels diferents tipus de bioreactors i de les solucions tecnològiques que s'utilitzen actualment per a controlar i automatitzar la seva operació. La rèplica del bioreactor existent es va substituir per la proposta de disseny d'un nou reactor amb prestacions equivalents al les de l'anterior, però afegint, si convingués, noves característiques derivades de l'estudi inicial.

Així doncs, els objectius definits per a aquest treball són:

- Realitzar un estudi de l'estat de la tècnica dels bioreactors anaerobis i de l'enginyeria de control i automatització que s'hi aplica.

- Proposar el disseny d'un sistema de control i automatització per a un bioreactor que doni resposta a les necessitats detectades a l'estudi inicial. Aquesta proposta haurà d'incloure les prestacions del bioreactor ja disponible i automatitzat per Camarasa (2019), però podrà incloure altres característiques considerades d'interès a l'estudi inicial. En qualsevol cas, el disseny haurà de ser prou flexible per permetre ampliacions futures per afegir nous sensors o actuadors.

Respecte al plantejament inicial, aquest treball perd el muntatge i posada en marxa del nou bioreactor, però no perd cert caràcter pràctic, ja que el disseny proposat té com a finalitat la construcció del reactor quan les circumstàncies ho permetin. Per altra banda, el nou plantejament aporta un major coneixement relacionat amb els bioreactors i els seus sistemes d'automatització i control, ja que l'estudi inicial no es limita al bioreactor ja disponible. Així mateix, la proposta de disseny no es reduirà a replicar les prestacions del sistema anterior, ja que l'estudi inicial permetrà considerar altres característiques d'interès.

3. Estudi previ

Amb l'objectiu de contextualitzar l'interès d'aquest treball i la posterior proposta de disseny, a continuació es presenta un estudi teòric de caràcter específic sobre el procés d'obtenció de metà, les variables que intervenen en aquest procés, els tipus de bioreactors que s'utilitzen tant a la indústria com a nivell de laboratori i les tecnologies que es poden aplicar en la seva automatització.

3.1 Obtenció de biogàs

El biogàs és el producte gasós de la digestió anaeròbia de compostos orgànics. La seva composició, que depèn del substrat digerit i de el tipus de tecnologia utilitzada, és aproximadament la següent:

- 50 % - 70 % de metà (CH_4).
- 30 % - 40 % de diòxid de carboni (CO_2).
- ≤ 5 % d'hidrogen (H_2), àcid sulfhídric (H_2S) i altres gasos.

A causa del seu alt contingut en metà, té un poder calorífic lleugerament superior que la meitat del poder calorífic del gas natural, de l'ordre de 5.500 Kcal/m³ (6,4 kWh/Nm³).

El biogàs produït en processos de digestió anaeròbia pot tenir diferents usos:

- En una caldera per a generació de calor o electricitat.
- En motors o turbines per generar electricitat.
- Introducció d'aquest en una xarxa de transport de gas natural (purificat i amb els additius necessaris).
- Com a material base per a la síntesi de productes d'elevat valor afegit com és el metanol o el gas natural líquid.
- Combustible d'automoció.

A més de metà i diòxid de carboni, al biogàs també trobem una sèrie de compostos no desitjats: aigua, sulfur d'hidrogen, monòxid de carboni i compostos orgànics volàtils com hidrocarburs halogenats, siloxans, etc. Per tant, és necessària la neteja del combustible depenent de l'ús final.

Ús final	Eliminació aigua	Eliminació CO ₂	Eliminació H ₂ S
Producció tèrmica en caldera	parcialment	no cal	depèn de la caldera
Producció electricitat en motors estacionaris	de manera parcial o completa	depèn del motor	de manera parcial o completa
Combustible de vehicles o turbines	completa	completa	completa
Gas natural per a calefacció	completa	completa	completa

Taula 1. Requeriments de pretractament en funció del compost a eliminar i l'ús final del biogàs (IDAE, 2007).

3.1.1 Producció de biogàs

Per a un sistema anaerobi, la demanda química d'oxigen (DQO) pot considerar-se un paràmetre conservatiu, és a dir, la suma de les DQO d'entrada ha de ser igual a la suma de les DQO de sortida:

$$DQO_{\text{entrada}} = DQO_{\text{sortida}} + DQO_{\text{biogàs}}$$

Si es considera un biogàs format exclusivament per CH₄ i CO₂, i es té en compte que la DQO del CO₂ és nul·la, la DQO eliminada en el residu es correspondria amb la DQO obtinguda en forma

de metà, la qual cosa significa 2,857 kg DQO per m³ CH₄ , o 0,38 m³ de CH₄ per kg de DQO eliminada, a P = 1 atm i T = 25 °C.

Atenent a la potència calorífica del metà, aquests valors correspondrien aproximadament a 3,5 kWh/kg DQO eliminada, en unitats d'energia primària. Això confereix als sistemes anaerobis un clar avantatge enfront dels sistemes aerobis de tractament de residus orgànics i aigües residuals, per als quals el consum d'energia per transferir oxigen es troba al voltant d'1 kWh/kg O₂ consumit.

Variacions sobre els valors anteriors poden ser deguts a possibles acumulacions al reactor, a la producció d'altres gasos (H₂, H₂S, ...), o al fet que la DQO mesurada no sigui tan sols deguda al carboni oxidable.

A la figura 1 s'il·lustra aquesta conservació de la DQO en el procés de digestió anaeròbia per a un residu amb un 10 % de la DQO no biodegradable, en què el 90 % de la DQO inicial és transforma en CH₄.

3.1.2 Digestió anaeròbia i codigestió

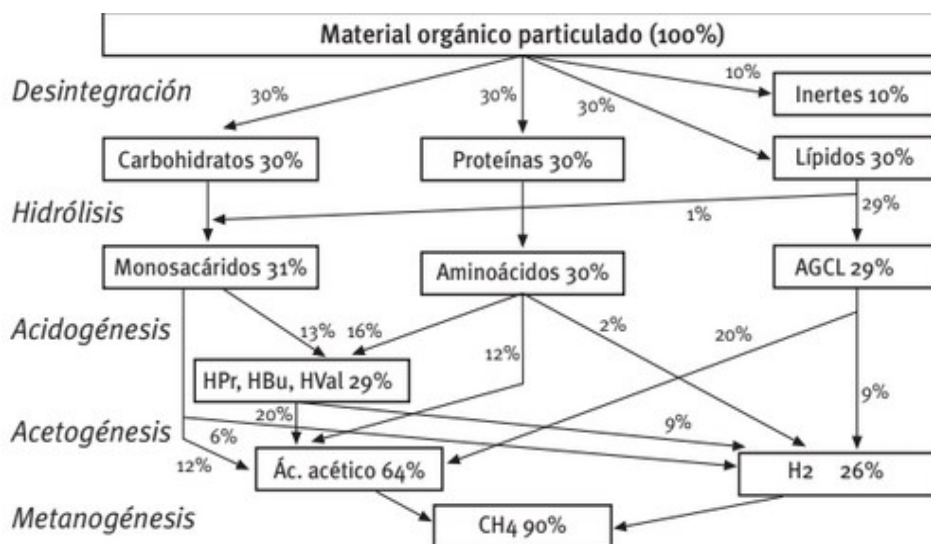


Figura 1. Flux de DQO (Demanda Química d'Oxigen) en el procés de digestió anaeròbia de matèria orgànica particulada, formada per un 10% de materials inerts i un 90% d'hidrats de carboni, proteïnes i lípids, a parts iguals (Batstone et al., 2002 i GIRO).

A partir de la introducció de dissenys de plantes de digestió anaeròbia als anys 90, la digestió anaeròbia de residus orgànics ha rebut una atenció mundial (Karagiannidis i Perkoulidis, 2009). És un procés mitjançant el qual gairebé qualsevol residu orgànic es pot transformar biològicament en una altra forma, en absència d'oxigen. Les diverses poblacions microbianes degraden els residus orgànics, la qual cosa resulta en la producció de biogàs i altres compostos orgànics rics en energia com a productes finals (Lastella et al., 2002; Lata et al., 2002). Una sèrie de reaccions metabòliques com la hidròlisi, l'acidogènesi, l'acetogènesi i la metanogènesi estan implicades en el procés de descomposició anaeròbia (Park et al., 2005; Charles et al., 2009).

La digestió anaeròbia és aplicable a una àmplia gamma de materials que inclouen residus municipals, agrícoles i industrials i residus vegetals (Kalra i Panwar, 1986; Gallert et al., 1998; Chen et al., 2008) i es considera una tecnologia viable en el tractament competent dels residus orgànics i la producció simultània d'energies renovables (De Baere, 2006; Jingura i Matengaifa, 2009). També es tracta d'una solució per eliminar les males olors dels residus orgànics, així com una tecnologia d'utilitat ambiental ja que redueix els gasos d'efecte hivernacle derivats de la reducció d'emissions incontrolades de metà (sent aquest 20 vegades més contaminant que el diòxid de carboni).

D'altra banda, el procés anaeròbic presenta alguns desavantatges com els temps de retenció llargs (Fernández et al., 2010) i les baixes eficiències d'eliminació de compostos orgànics (Park et al., 2005). A més, aquest procés també és sensible a alts nivells d'amoníac lliure derivats de la degradació anaeròbica dels components proteics rics en nitrogen (Fountoulakis et al., 2008) ja que l'activitat específica dels bacteris metanogènics es veu afectada amb les concentracions creixents d'amoníac (Chen et al., 2008). També la composició i estructura química dels materials lignocel·lulòsics dificulta la taxa de biodegradació de residus orgànics sòlids. S'ha documentat que la hidròlisi de la matèria orgànica complexa en compostos solubles és l'etapa que limita la velocitat dels processos anaerobis per a residus amb un alt contingut sòlid (Chulhwan et al., 2005; Mumme et al., 2010). En conseqüència, calen diversos pretractaments físics, químics i enzimàtics per augmentar la solubilitat del substrat i accelerar la taxa de biodegradació dels residus orgànics sòlids (Torres i Llorens, 2008; Charles et al., 2009).

La digestió anaeròbia es pot dur a terme amb diferents residus amb la premissa que tots siguin líquids, orgànics, continguin material fermentable i amb una composició i concentració

relativament estable. Es parla de codigestió quan diferents residus son tractats al mateix temps i aquests es complementen entre sí i, per tant, assoleixen de manera sinèrgica aquests requeriments (Agdag i Sponza, 2007). S'utilitza aquest mètode per millorar els rendiments de la digestió anaeròbia ja que millora la dilució de compostos tòxics, augmenta la càrrega de matèria orgànica biodegradable i assoleix un efecte sinèrgic dels microorganismes degut a un millor equilibri de nutrients.

S'ha observat que la codigestió de les mescles estabilitza l'alimentació al bioreactor, millorant així la relació C/N i disminuint la concentració de nitrogen (Cuetos et al., 2008).

L'ús d'un cosubstrat amb un baix contingut de nitrogen i lípids en residus augmenta la producció de biogàs degut a les característiques complementàries d'ambdós tipus de residus, reduint així problemes associats a l'acumulació de compostos volàtils intermedis i altes concentracions d'amoníac (Castillo et al. , 2006).

Diversos estudis han demostrat que es poden digerir barreges de residus agrícoles, municipals i industrials amb èxit i eficàcia junts. S'ha observat un efecte estimulants sobre la síntesi de gas metà quan es codigestava els fangs industrials amb residus sòlids municipals (Agdag i Sponza, 2007).

3.1.2.1 Fases de la digestió anaeròbia

Cinc grans poblacions de bacteris, diferenciats per la seva acció metabòlica, s'encarreguen de dur a terme les diferents fases d'aquest procés anaerobi (Themelis i Ulloa, 2007):

- Primerament es dona la despolimerització dels grans complexos orgànics per acció d'enzims hidrolítics (etapa hidrolítica), obtenint molècules solubles i de fàcil degradació, com son els hidrats de carboni, aminoàcids, àcids grassos de cadena llarga i els alcohols.
- A continuació obtenim àcids grassos de cadena curta per acció de bacteris acidogènics (etapa acidogènica), principalment àcid acètic, propiònic, butíric i valèric. Els bacteris que intervenen en aquestes primeres fases segreguen els enzims al medi, i per tant es tracta d'un procés extracel·lular. Inclouen espècies de *Butyivibrio*, *Propionibacterium*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococos*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococos* i *Enterobacteris* (Castells, 2012).

- Seguidament s'obté àcid acètic, hidrogen i diòxid de carboni a partir dels productes intermedis. Els bacteris que actuen s'anomenen acetogènics i destaquen les espècies *Syntrophobacter wolinii* i *Syntrophomonas wolfei*, que descomponen àcid propiònic i butíric, respectivament. També s'inclou en aquesta etapa l'obtenció d'àcid acètic a partir de hidrogen i diòxid de carboni per acció dels bacteris homoacetogènics, que inclouen gèneres com *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium*, *Acetogenium*, *Clostridium* o *Eubacterium*.
- Per últim, l'àcid acètic i l'hidrogen restant són transformats a metà i diòxid de carboni per dos tipus diferents de bacteris: els que degraden l'àcid acètic (metanogènics acetoclàstics) i els que consumeixen hidrogen (metanogènics hidrogenòfils). Tot i que la major part del metà es forma a partir de l'àcid acètic, només dos gèneres s'encarreguen de fer-ho: *Methanosarcina* i *Methanothrix*. En canvi, als hidrogenòfils es troben els gèneres *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanobrevibacter* o *Methanogenium* entre d'altres.

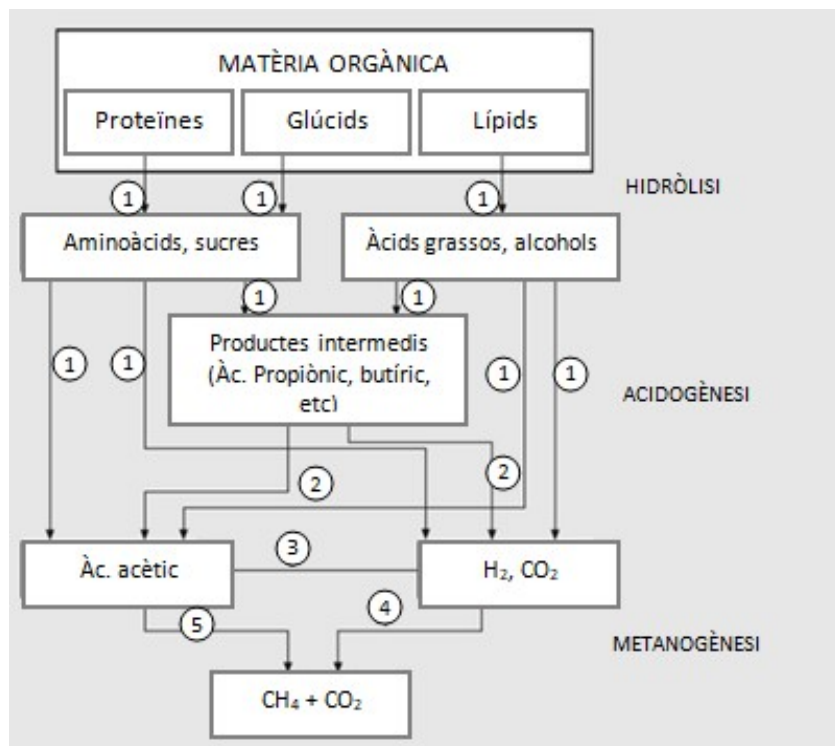


Figura 2. Fases de la digestió anaeròbia i productes intermedis (Flotats et al., 2003).

3.2 Paràmetres ambientals

Per tal de mantenir el bon desenvolupament del procés de digestió, s'han de controlar diferents paràmetres. S'anomenen de paràmetres ambientals els que fan referència a les condicions de la matèria orgànica a digerir. Aquests són:

3.2.1 pH

En un procés de digestió anaeròbia, el grau d'acidesa/alcalinitat del medi a digerir ve donat per l'equilibri entre la quantitat que té aquest de cations (sodi, potassi, calci, magnesi i amoni), anions (carbonat i fosfat), àcids grassos volàtils i la pressió parcial del diòxid de carboni present (Bonmatí, 1998). Com s'ha descrit anteriorment, en el procés de digestió anaeròbia intervenen diferents tipus de microorganismes que actuen per a cada fase. Lee et al. (2009) va informar que la metanogènesi en un digestor anaeròbic es produeix de manera eficaç a pH 6,5 - 8,2, mentre que la hidròlisi i la acidogènesi es produeixen a pH 5,5 i 6,5, respectivament (Kim et al., 2003). Al sistemes de bioreactors de diferents fases es poden mantenir aquests rangs de pH més ajustats i de manera independent, mentre que si totes les reaccions metabòliques es donen en un mateix bioreactor el més idoni és mantenir el pH proper a la neutralitat (Liu et al., 2008).

Alguns residus tenen baixa alcalinitat (efecte tampó) i per això mateix és necessari anar controlant el pH per tal de corregir-lo. Per exemple, en el cas de la fracció orgànica de residus municipals (FORM), aquesta capacitat d'amortiguació baixa durant l'acetogènesi i s'ha de puja el pH afegint bicarbonat de sodi (Castillo et al., 2003).

Es considera que una alcalinitat superior a 1,5 g CaCO_3/L és favorable per al control del pH (Flotats et al., 2003).

3.2.2 Alcalinitat

És una mesura de la capacitat d'una solució per a neutralitzar els àcids i típicament es mesura en mg/l de CaCO_3 . S'anomena alcalinitat total aquella mesurada a un pH de 4,3 i alcalinitat parcial a la mesurada a un pH de 5,75. L'alcalinitat total es veu més afectada per fluctuacions en la concentració de bicarbonat i AGVs, el que fa que sigui més insensible a pertorbacions al procés de digestió. En canvi, l'alcalinitat parcial es mostra com una mesura més robusta per avaluar la inestabilitat d'un bioreactor. Aquest fet ha impulsat el desenvolupament de

diferents equips per assolir la monitorització en línia d'aquest paràmetre (Björnsson et al., 2001; Jantsch et al., 2004; Molina et al., 2009). No obstant, no sempre es tracta d'una mesura fiable, especialment en digestors amb un alt nivell de nitrogen amoniacal procedent de residus amb un alt contingut en proteïna (REDC, 2016).

3.2.3 Potencial redox (ORP)

És anàloga a la mesura de pH ja que el pH mesura l'activitat dels protons i el potencial redox la dels electrons. En aquest cas, els electrons indiquen les relacions d'oxigen dels microorganismes vius i és emprat per especificar l'ambient en el que un microorganisme és capaç de generar energia i sintetitzar noves cèl·lules sense recórrer a l'oxigen molecular. En general es pot considerar que els bacteris metanogènics constitueixen el grup biològic que més influeix en l'èxit del procés de digestió anaeròbia. És per això que el potencial redox ha de ser suficientment baix (-300 mV) per a que es pugui donar el bon desenvolupament de poblacions anaeròbies estrictes (Acosta et al., 2005).

3.2.4 Nutrients

Abans d'iniciar un procés de digestió, el substrat s'ha de caracteritzar pel contingut de carbohidrats, lípids, proteïnes i fibra. La concentració inicial i el contingut sòlid total del substrat al bioreactor pot afectar significativament el rendiment del procés i la quantitat de metà produït durant el procés (Fernández et al., 2008). De les diferents proporcions d'aquests nutrients depèn el desenvolupament de les diferents poblacions bacterianes i dependrà completament de la naturalesa de cada residu orgànic. En general els residus ramaders no presenten problemes per falta de macronutrients o micronutrients (Flotats et al., 2003), no obstant es troben residus en els quals les proporcions adequades no es compleixen i en aquests casos és interessant aplicar codigestió per assegurar un bon equilibri.

3.2.4.1 Nitrogen

El nitrogen és essencial per a la síntesi de proteïnes i es necessita principalment com a nutrient per als microorganismes en la digestió anaeròbia (Kayhanian i Rich, 1995). Els compostos nitrogenats dels residus orgànics solen ser proteïnes que es converteixen en amoni mitjançant la digestió anaeròbica (Sawayama et al., 2004). En forma d'amoni, el nitrogen contribueix a l'estabilització del valor de pH al bioreactor on s'està duent a terme el procés. Els microorganismes assimilen amoni per a la producció de nova massa cel·lular. Una relació de

nutrients dels elements C: N: P: S a 600: 15: 5: 3 es considera suficient per a la metanització (Fricke et al., 2007). L'amoníac en alta concentració pot conduir a la inhibició del procés biològic i inhibeix la metanogènesi a concentracions superiors als 100 mM aproximadament (Fricke et al., 2007). Sterling et al. (2001) va trobar que la quantitat d'amoníac al digestor també pot afectar la producció d'hidrogen i l'eliminació de sòlids volàtils.

3.2.4.2 Relació C/N

Aquesta relació té un paper fonamental en el procés. Com s'ha mencionat a l'apartat anterior, per a la millora de les proporcions nutricionals i C/N, es fa una codigestió de barreges orgàniques (Cuetos et al., 2008). Per exemple, la codigestió de residus de peix, aigües residuals per a escorxadors i fangs activats amb residus de fruites i verdures faciliten l'equilibri de la relació C/N.

Complir una bona relació C/N beneficia l'amortització de la taxa de càrrega orgànica i la producció d'amoníac anaeròbic a partir de nitrogen orgànic, que redueixen les limitacions de la digestió de residus. Segons diferents autors, les proporcions idònies ronden al voltant de 20/30.

3.2.4.3 Àcids grassos volàtils

Els AGVs són considerats com un dels paràmetres de control més adequats per tractar-se de un dels intermediaris més importants en el procés de digestió anaeròbia. La seva acumulació és un clar indicatiu de desequilibri en aquest procés i es poden mesurar de manera total o individual. Inicialment es tractava d'un anàlisi complex i la seva aplicació es veia limitada, però des de fa una dècada aproximadament, s'han fet gran avenços en aquest camp. Existeixen tècniques de valoració en línia (Molina et al., 2009a), així com tècniques d'espectroscopia basades en NIR (infraroig proper) (Jacobi et al., 2011; Krapf et al., 2013) i FTIR (infraroig per transformada de Fourier) (Steyer et al., 2002b). Per a mesurar AGVs de manera individual es requereixen tècniques de cromatografia en fase gasosa o líquida (Pind et al., 2002; Zumbusch et al., 1994). Aquestes darreres són més precises però pugen el cost i la complexitat de la mesura (RECD, 2016).

3.2.5 Tòxics i inhibidors

Es declara com a substància tòxica aquella que provoca l'aturada total de l'activitat microbiana i de substància inhibidora quan l'aturada és de tipus parcial, de forma que es reflexa en un descens de la producció de metà. Ambdós causen efectes adversos en el metabolisme bacterià. Aquestes substàncies poden ser àcids grassos, nitrogen amoniacal, sulfurs i sulfats, alguns cations, metalls pesants i fins i tot oxigen (Kroeker et al., 1979), però només en certes concentracions ja que en petita quantitat poden resultar promotores de la reacció metanogènica. Els que resulten inhibidors a baixes concentracions són els compostos anàlegs al metà, com ara el cloroform (CHCl_3), el tetraclorur de carboni (CCl_4) o el clorur de metilè (CH_2Cl_2) (Serra, 2007). Les formes no ionitzades dels àcids grassos volàtils, així com l'amoníac lliure o l'àcid sulfhídric són inhibidors d'importància dels bacteris metanogènics, tot i que de tipus reversible. També cal destacar que la toxicitat o inhibició d'una substància també depèn de l'aclimatació dels bacteris (Flotats et al., 2001).

3.3 Paràmetres operacionals

Aquests fan referència a les condicions de treball dels bioreactors. Molts dels paràmetres següents són indicadors de que el procés de digestió anaeròbia s'està duent a terme correctament o hi ha algun tipus de pertorbació que impedeix l'optimització d'aquest. Cal destacar que no existeix un consens sobre quin és el paràmetre ideal per al control avançat d'un digestor anaerobi, i que tan sols la combinació de certs indicadors escollits segons la tipologia de residu i les característiques de bioreactor fan possible un control amb certa robustesa i exhaustiu en la majoria de casos (Madsen et al. 2011).

3.3.1 Temperatura

Aquest paràmetre és de vital importància per al procés, ja que les poblacions de microorganismes son especialment sensibles als canvis de temperatura. Parlem de règim psicròfil entre 5°C i 20°C, de règim mesòfil de 20°C a 40°C i de règim termòfil de 40°C a 60°C. A més temperatura, menys tolerància al canvi presenten els microorganismes, però per altra banda s'augmenta la velocitat de creixement dels bacteris, la producció de biogàs i una disminució dels temps de retenció (ISAT, 2011). Si el nitrogen amoniacal no és un factor limitant es pot treballar en règim termòfil ja que promou la destrucció de patògens, de llavors de plantes adventícies i d'ous i larves d'insectes. Tot i així és més habitual treballar en règim

mesòfil degut a l'efecte inhibitor d'alguns compostos a alta temperatura i d'un major requeriment de control d'aquesta (Flotats et al., 2008).

3.3.2 Agitació

Depèn del tipus de bioreactor és important comptar amb un sistema d'agitació per tal de:

- prevenir la sedimentació
- evitar zones mortes que disminueixin el volum efectiu del bioreactor
- assegurar homogeneïtat en les poblacions de bacteris
- prevenir la formació d'escumes
- dispersar substàncies inhibidores o tòxiques
- major contacte entre biomassa i substrat
- extracció de gasos de la mescla

El grau d'agitació ha de ser moderat, sense trencar agregats bacterians. És recomanable que la potència de l'agitació sigui de 30 a 100 Wh/m³dia (flotats et al., 2008).

3.3.3 Temps de retenció hidràulic i cel·lular (TRH i TRC)

Es defineix com a TRH és el temps promig que roman l'influent d'un bioreactor sota l'acció dels organismes que el descomponen. En bioreactors discontinus el TRH està ben definit, mentre que per processos continus aquest es defineix com el quocient entre el volum del digestor i el cabal a tractar (ISAT, 2011). El cabal d'entrada és la variable més emprada per al control avançat del temps de retenció de processos anaerobis (REDC, 2016). En canvi, el TRC correspon al temps promig que els microorganismes són dins del digestor. Aquests dos temps només coincideixen quan el reactor està perfectament agitad i la seva càrrega és homogènia o quan el bioreactor compta amb un sistema de retenció de sòlids. La selecció del temps de retenció òptim depèn de la temperatura del procés, de la composició del substrat i de l'acció dels microorganismes, però sobretot s'ajusta al creixement d'aquests últims. Això és degut a que si el temps de retenció és molt curt, als microorganismes no els dóna temps a reproduir-se. Com a conseqüència baixaria la producció de metà i augmentarien els productes intermedis que poden inhibir la metanogènesi. En el cas contrari, a mesura que augmenta el temps de retenció, augmenta la taxa d'eliminació de matèria orgànica biodegradable (Flotats et al., 2008).

3.3.4 Velocitat de càrrega orgànica (OLR)

Es defineix com la quantitat de matèria orgànica que entra en un bioreactor per unitat de temps i de volum del digestor; per tant es pot calcular com el quocient entre la DQO i el temps de retenció hidràulic. A mida que puja la càrrega orgànica disminueix el temps de retenció i, per tant, la matèria orgànica es descomposta de manera més lenta. S'acostuma a treballar amb valors de OLR inferiors a 3,5 - 4 kg SV/m³·dia per assegurar una correcta producció de biogàs (Flotats et al., 2008).

3.4 Digestors anaerobis

Un bioreactor és un aparell per fer créixer microorganismes sota unes condicions controlades que s'utilitza en processos industrials o experimentals amb la finalitat de produir metabòlits primaris, secundaris o biogàs. Es componen principalment d'un tanc o contenidor on es duu a terme la reacció, i depenent del tipus de reactor també pot incorporar a la seva configuració: agitador, sistema d'aeració, deflectors homogeneïtzadors, manòmetre, sistema de refrigeració o calefacció, ports d'entrada i sortida de material, vàlvules, filtres i sovint cel·la de descàrrega.

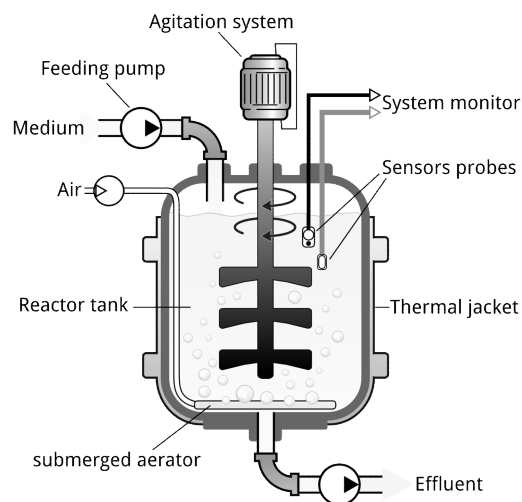


Figura 3. Elements usuals en un digestor CSTR (Minguez, 2015).

Existeix una gran varietat de digestors anaerobis a la indústria i es poden classificar segons diferents criteris: segons el model de flux, segons les condicions d'operador del digestor, segons la temperatura, etc. A continuació es fa una descripció detallada de les configuracions més simples emprades a nivell de laboratori:

3.4.1 Reactor de mescla completa sense recirculació

Es manté una distribució uniforme de concentracions, tant de substrat com de microorganismes, que s'aconsegueix mitjançant un sistema d'agitació (figura 4a). Aquesta pot ser mecànica (agitador d'hèlix o pales, d'eix vertical o horitzontal) o pneumàtica (recirculació de biogàs a pressió), i mai violenta. Aquest tipus de reactors són útils perquè poden realitzar una digestió ràpida amb equips senzills i barats i també són útils per avaluar fàcilment la taxa de digestió (Weiland, 2006). A més, aquesta tipologia de reactor no ofereix problemes de disseny i és el més utilitzat per a residus. D'altra banda, aquests reactors també tenen algunes limitacions, com ara altes fluctuacions en la producció de gas, la qualitat d'aquest, les pèrdues de biogàs durant el buidatge dels bioreactors i les altures restringides (Linke et al., 2006). Comparativament amb altres reactors, el temps de retenció necessari és alt, pel fet que la concentració de qualsevol espècie, que es manté en el reactor en règim estacionari, és la mateixa que la que es pretén en l'efluent. Si la velocitat de reacció depèn de la concentració, com és el cas dels processos biològics, la velocitat serà baixa, i la forma de compensació és major el temps de reacció (IDAE, 2007).

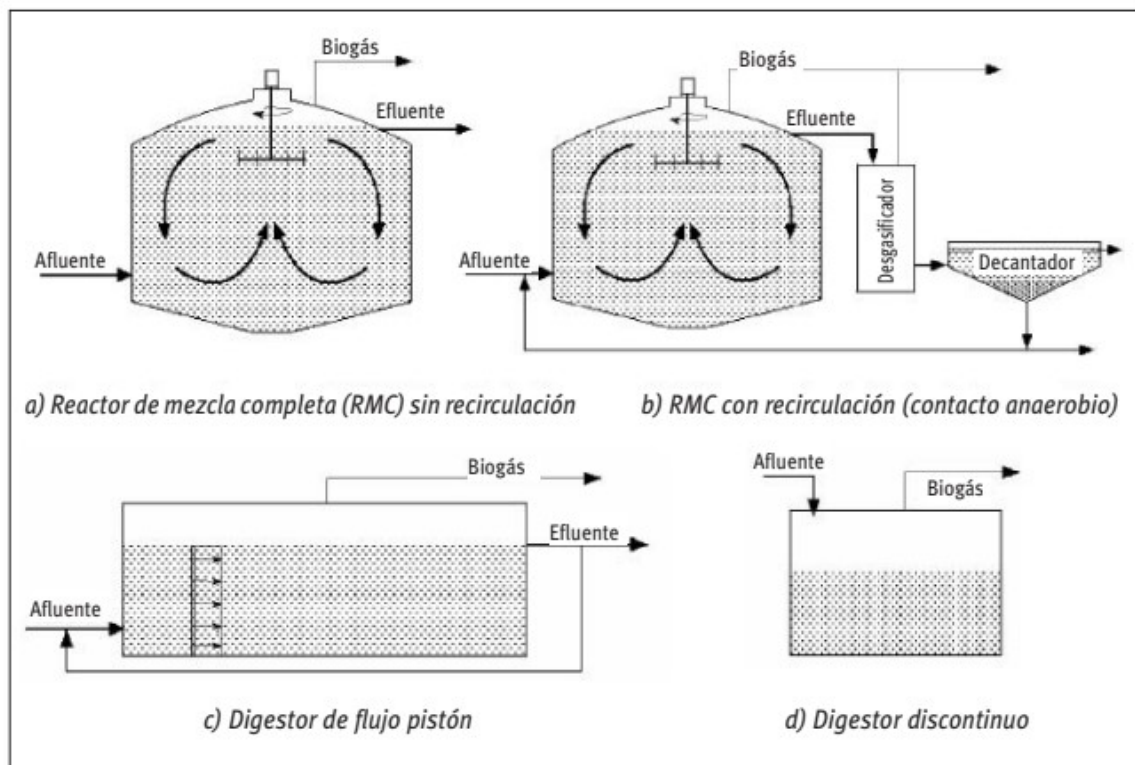


Figura 4. Tipus de bioreactors de biomassa suspesa (IDAE, 2007).

3.4.2 Reactor de mescla completa amb recirculació

També s'anomena reactor anaerobi de contacte i és equivalent a un sistema de fangs actius aerobis per al tractament d'aigües residuals (figura 4b). Regulant la recirculació és possible aconseguir que el temps de retenció sigui més baix que en un reactor simple de mescla completa. Això és a costa d'augmentar el temps de retenció cel·lular, gràcies al seu confinament en el sistema mitjançant la separació al decantador i recirculació. A causa de la necessària separació de microorganismes al decantador, aquest sistema només és aplicable a aigües residuals amb una alta càrrega orgànica (aigües residuals d'indústries sucreres, cerveseres, etc.), per a les que sigui possible una separació de fases líquid-sòlid, amb la fracció sòlida generant flocs. Abans del decantador s'ha de disposar d'un sistema de desgasificació, sense el qual la decantació es pot veure afectada (IDAE, 2007).

3.4.3 Reactor amb retenció de biomassa sense recirculació

El fet de retenir la biomassa dins del digestor fa que es redueixi el temps de retenció. Es fa mitjançant immobilització sobre un suport, com són els llits fluiditzats o els reactors en llit de llots.

3.4.3.1 Llit fluiditzat

Microorganismes fixats formen un biofilm sobre partícules de material inert que es mantenen fluiditzades gràcies al flux ascendent de l'influent (figura 5b). Es recircula l'efluent per tal de mantenir el cabal i el contingut de biomassa. Es tracta d'un sistema apropiat per a tractar aigües residuals d'indústries agroalimentàries i fraccions líquides de residus ramaders. La diferència amb els digestors de llit fix és que en aquests segons microorganismes creixen sobre els suports de suport estacionaris (figura 5.a)

3.4.3.2 Llit de llots

En aquest tipus de bioreactors, la immobilització es fa per floculació dels microorganismes, formant grànuls o consorcis (figura 5c i 5d). A la part superior del digestor ha d'haver-hi un separador líquid/sòlid/gas que faci que aquests es mantinguin suspesos al medi líquid. L'*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) és el disseny més emprat per a reactors d'aquestes característiques. Es tracta d'un disseny prou simple però té un clar limitant: la biomassa ha de

tenir ser d'una certa densitat perquè granuli. És un sistema apropiat per tractar aigües residuals d'indústria alimentària (IDAE, 2007).

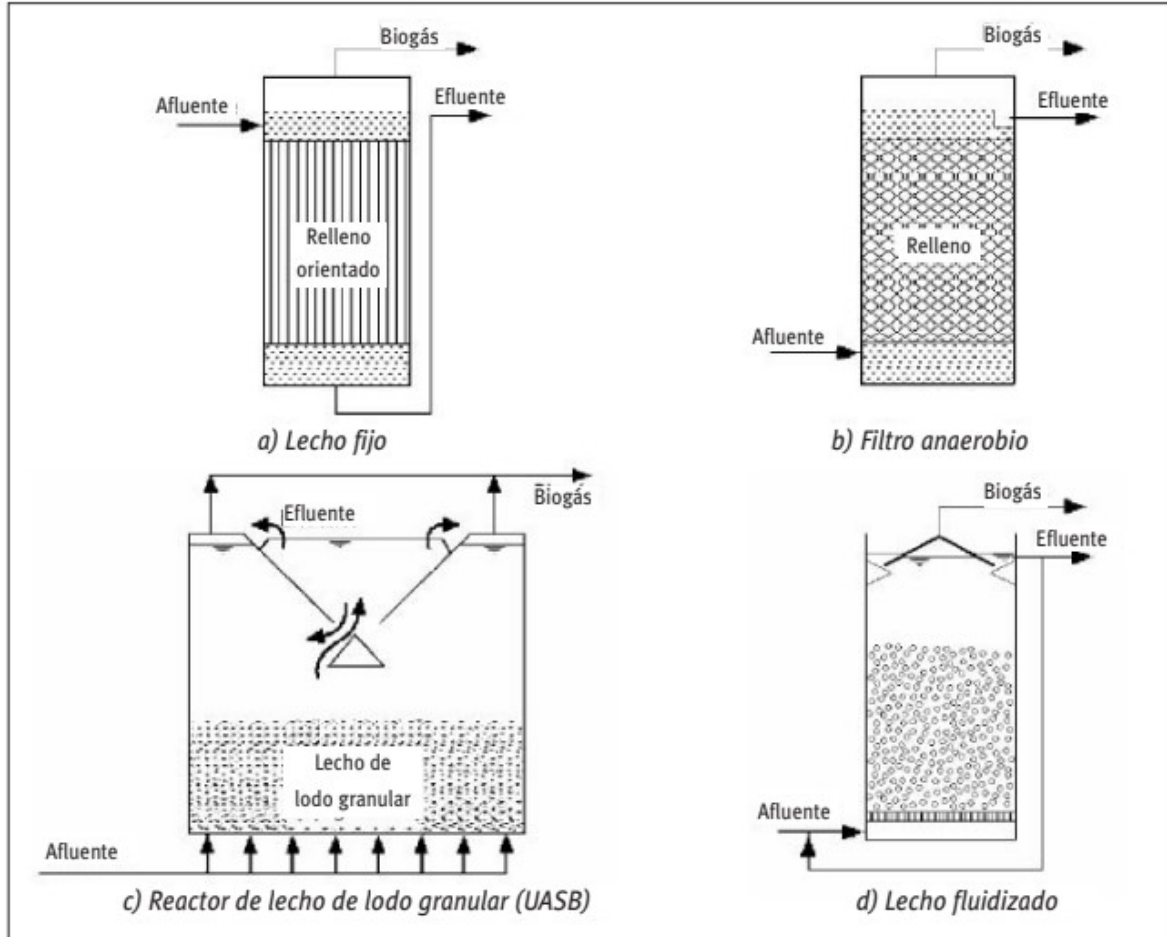


Figura 5. Tipus de bioreactors de biomassa immobilitzada o fixada (IDAE, 2007).

3.4.4 Sistemes discontinus

També són anomenats batch (figura 4.d) i són els més senzills. S'omplen amb la matèria primera i es deixen per un període de temps (es pot considerar com al temps de retenció hidràulica) després del qual es buiden. La seva aplicació principal és el tractament de residus amb una alta concentració de sòlids que dificulten el bombeig, com en el cas dels residus ramaders (Parawira et al., 2004).

3.4.5 Sistemes de dues etapes

Aquests sistemes consisteixen en separar l'etapa hidrolítica en un bioreactor diferent degut al requeriment d'un temps de retenció més alt en aquesta fase (figura 6). Això permet treballar amb diferents poblacions de microorganismes més adaptats a cada procés. A més, aquest tipus

de sistemes augmenten l'estabilitat del procés controlant la fase d'acidificació mitjançant l'optimització del temps de retenció hidràulica per evitar la sobrecàrrega i la acumulació de substàncies tòxiques o inhibidores . D'aquesta manera, el primer reactor compta amb un temps de retenció prou alt com per afavorir la hidròlisi, i en el cas que aquest fos un reactor discontinu, es fa servir un filtre percolador per emplenar el següent reactor. El segon reactor compta amb un temps de retenció més baix on es digereixen els àcids intermitjos i la matèria orgànica dissolta (Demirer et al., 2005).

Es considera un procés prometedori per tractar els residus orgànics amb alta eficiència en termes de rendiment de degradació i producció de biogàs (Fezzani i Cheikh, 2010) i és eficaç per tractar residus on l'etapa limitant és la hidròlisi, com pot ser restes vegetals d'indústria alimentària, residus sòlids urbans o residus bovins (Fezzani i Cheikh, 2010).

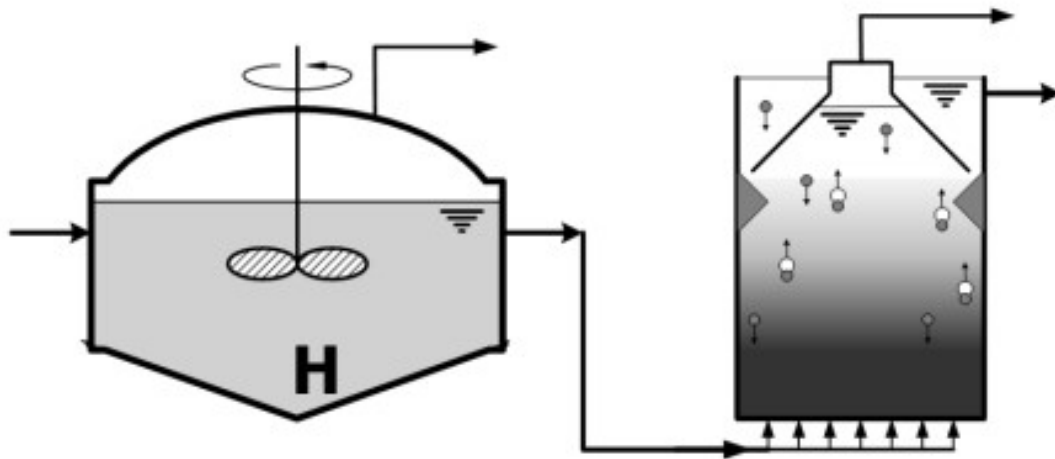


Figura 6. Sistema de dues etapes: Hidròlisi i filtre percolador (diapositives X. Flotats).

3.4.6 Sistemes de dues fases

En aquest cas els reactors estan connectats en sèrie i es separen la fase d'acidogènesis de la de metanogènesis amb l'objectiu de disminuir el temps de retenció global. Els temps són inferiors a un reactor de mescla completa. Els bacteris acetogènics tenen una taxa de creixement més alta i, per tant, un temps de retenció inferior. Es tracta de sistemes òptims per al tractament de residus amb molta concentració de sucres i poca de sòlids. En canvi no és un sistema compatible amb residus rics en fibres o substrats d'alta complexitat on la fase limitant és la d'hydròlisi (IDAE, 2007).

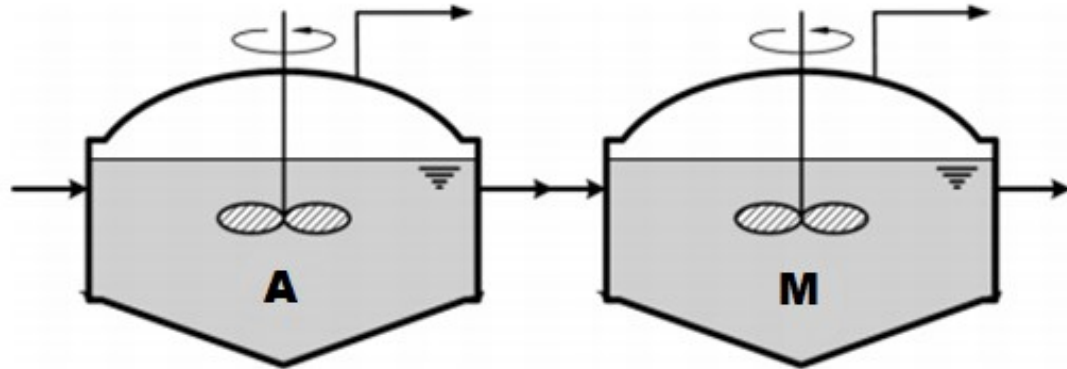


Figura 7. Sistema de dues fases que separa l'acidogènesi de la metanogènesi (diapositives X. Flotats).

3.5 Automatització de bioreactors

L'automatització de bioreactors respon a la necessitat de control de la producció de biogàs. El fet de que les poblacions bacterianes realitzin la metanogènesi de manera adequada sota unes condicions ambientals i operacions estrictes, requereix una supervisió constant i la rectificació d'aquestes en cas de que no es pugui dur a terme la reacció de manera correcta.

Inicialment van sorgir alguns inconvenients que restaven popularitat ha aquestes solucions tecnològiques, com ara l'alt cost de la instrumentació avançada (REDC, 2016) però avui dia es disposa d'un ampli catàleg de tecnologia específica per a qualsevol necessitat i a l'abast de gairebé tothom.

Cal destacar, que els sistemes biològics es caracteritzen, en general, per tractar-se de processos amb variacions graduals en el temps, per la qual cosa no es requereix d'una alta freqüència de mesura i en quant a sistemes d'adquisició de dades i actuadors, es poden valorar opcions menys potents, ja que no cal una alta freqüència de mesura. No obstant, s'ha de tenir en compte que les solucions més econòmiques són més susceptibles a possibles interferències.

En aquest treball es realitza un estudi detallat dels bioreactors actuals i de les possibilitats de la seva automatització, i a posteriori es presenta el disseny d'un sistema d'automatització i control aplicable a un digestor experimental.

A continuació es descriuen amb detall el tipus de sistemes que s'empren habitualment per a la supervisió i control dels sistemes biològics, tant a nivell de laboratori com industrial.

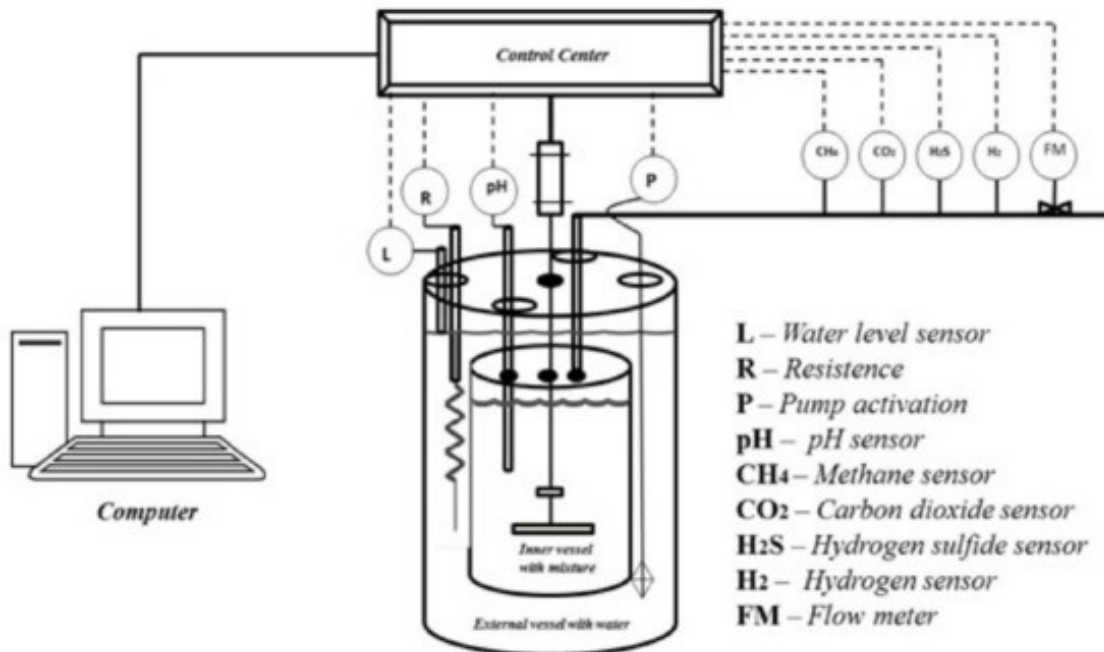


Figura 8. Exemple d'automatització per optimitzar la velocitat de càrrega orgànica d'un bioreactor de membrana anaeròbia que tracta aigües residuals amb un DQO elevat (Yu et al., 2016).

3.5.1 Sistemes SCADA

Els sistemes SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) són una eina d'automatització i control emprada en els processos productius que permet controlar, supervisar, recopilar i analitzar dades, i generar informes a distància mitjançant una aplicació informàtica. A grans trets, la seva definició és la d'una agrupació d'aplicacions informàtiques instal·lades en un ordinador, destinat al control automàtic d'una activitat productiva a distància que està interconnectada amb altres instruments anomenats de camp com són els autòmats programables (PLCs) i les unitats terminals remotes (RTUs). L'estructura bàsica d'un sistema SCADA es pot desglossar de la següent manera:

A. Mòdul d'entrada

El mòdul d'entrada té com a funció adquirir la informació del camp subministrat pels transductors i condicionar-los als seus nivells d'operació. La informació analògica obtinguda de

camp típicament ve representada en voltatges de 0 V a 5 V o per un flux de corrent de 0 mA a 1 mA. En canvi, la informació discreta es representa amb dos nivells de voltatge que són convertits pel mòdul d'entrada fi de ser processats. El mòdul d'entrada analògica processa aquesta informació mitjançant un convertidor analògic/digital (A/D) transformant en informació binària amb la finalitat de ser processat pel mòdul processador d'informació.

B. Mòdul de control

Aquest mòdul té com a funció el registre, recepció i transmissió dels comandaments de control rebuts des de la unitat mestra (MTU) o sistema supervisor. Ha de poder garantir la fiabilitat de l'operació mitjançant l'ús de mecanismes de seguretat i detecció d'errors. En general, el mòdul de control rep els missatges de la unitat mestra i es realitza la comprovació del codi per detectar errors de transmissió. Després d'efectuar la comprovació del codi i la descodificació de la direcció de forma satisfactòria, s'envia un missatge de resposta a la MTU.

C. Mòdul de processament d'informació (CPU)

La CPU és la unitat controladora de totes les funcions de la unitat terminal remota, ja que dirigeix totes les transferències de dades entre els registres i les localitats de memòria, i controla les interrupcions de la interfície de comunicació, que envia les dades de la RTU a la unitat mestra. Aquesta unitat central de processament és l'encarregada, com el seu nom l'indica, de processar la informació adquirida pels transductors o transmesa per la unitat mestra amb la finalitat d'executar una acció de control o de comunicació.

D. Mòdul de comunicacions

Aquest mòdul s'encarrega de codificar la informació rebuda del camp per poder ser transmesa pels canals de comunicació. De la mateixa forma, la informació rebuda de l'estació mestra és processada per aquest mòdul i descodificat.

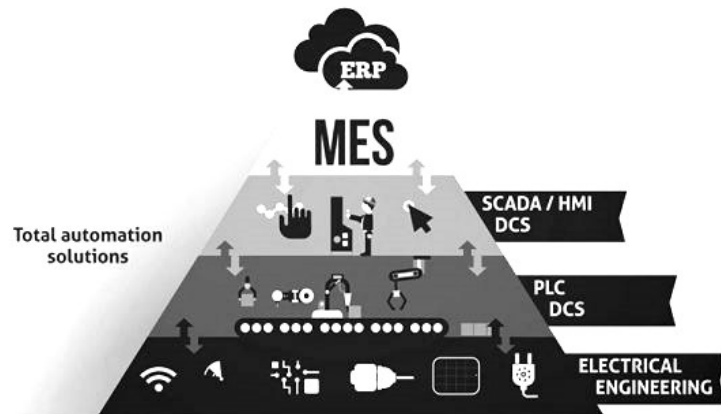


Figura 9. Diagrama representatiu dels sistemes SCADA a la Indústria 4.0 (CIC,2019).

Les funcions bàsiques d'un sistema SCADA són descrites a continuació:

- **Supervisió remota d'instal·lacions.**

Mitjançant aquesta funció, l'usuari és capaç de conèixer l'estat de les instal·lacions sota la seva responsabilitat i coordinar eficientment les tasques de producció i manteniment en el camp.

- **Control remot d'instal·lacions.**

Els sistemes SCADA permeten activar o desactivar equips remots (per exemple interruptors, transformadors, bombes, vàlvules, compressors, etc.) de manera automàtica o a sol·licitud de l'operador.

- **Presentació de gràfics dinàmics.**

Això es refereix a el desplegament de pantalles amb el diagrama del procés contenint informació instantània del comportament del mateix.

- **Generació d'informes.**

Permeten la generació automàtica (o a petició) de reports de producció i balanços.

- **Presentació d'alarmes.**

Mitjançant aquesta funció s'alerta a l'operador sobre l'ocurrència de condicions anormals o esdeveniments que poguessin requerir la seva intervenció. Normalment, la criticitat de l'esdeveniment o alarma s'indica mitjançant l'ús de colors i/o senyals auditives, tot i que es podria enviar una alerta telemàtica a dispositius mòbils. Les alarmes es registren per a anàlisis posteriors.

- **Emmagatzematge d'informació històrica.**

Els sistemes SCADA permeten registrar i emmagatzemar informació operacional i alarmes. Per exemple, es poden portar dades dels darrers 5 minuts, 1 hora, 1 dia, 1 mes i fins a un any.

- **Presentació de gràfics de tendències.**

Amb informació en temps real o històric, es poden construir gràfics i inferir el comportament de variables operacionals en el temps.

- **Programació d'esdeveniments.**

Es refereix a la possibilitat de programar en el temps la generació d'informes, desplegament de diagrames de el procés o activació de tasques o comandaments de sistema.

Aquests sistemes són d'aplicació ideal en sistemes biològics, com pot ser en aquest cas la producció de metà a partir de restes orgàniques, ja que proporciona informació del procés i té capacitat per actuar per a millorar-lo. Si es tractés d'un digester experimental com l'implementat a l'IRTA, l'objectiu principal de la seva utilització seria comptar amb un control precís del procés de digestió per tal de monitorar el bioreactor en qüestió i així automatitzar les tasques comunes, farragoses i rutinàries que ha de dur a terme l'investigador o operari, alliberant aquest d'una supervisió constant. També permet avaluar les dades amb el propòsit d'esmenar possibles errors, ajudant a mantenir l'eficiència, processant les dades per a prendre decisions més intel·ligents i comunicar els problemes del sistema per a ajudar a disminuir el temps de parada o inactivitat.

Per tant, un sistema SCADA ha d'estar en disposició d'oferir les següents prestacions:

- Han de comunicar-se amb total facilitat i de manera transparent a l'usuari amb l'equip de planta.

- Han de ser programes senzills d'instal·lar, sense excessives exigències de maquinari, i fàcils d'utilitzar, amb interfícies intuïtives.
- Han de ser sistemes d'arquitectura oberta, que pugui ser ampliat o adaptat a les necessitats canviants de l'usuari.
- Ha de poder generar històrics que puguin ser transferits a un full de càlcul.
- Preferentment, ha de tenir la possibilitat de crear alarmes per tal d'alertar l'operador d'una possible parada o situació irregular, amb registre d'incidències.

3.5.1.1 Software

El mercat de programari per automatitzar sistemes és molt ampli degut a les múltiples solucions que els autòmats ofereixen en qualsevol procés industrial, de laboratori, o fins i tot a nivell particular. D'aquesta manera trobem una gran varietat de softwares que, no només ens permeten crear una interfície que ens permet visualitzar el procés a temps real, sinó que la gran majoria són programables per tal de donar instruccions i actuar quan les mesures llinard siguin assolides.

A l'annex 1 es presenta un recull de softwares que es troben actualment al mercat amb les característiques més rellevants per a l'automatització d'un bioreactor tipus batch de digestió anaeròbia.

3.5.1.2 Hardware

Formant part dels sistemes SCADA podem trobar diferents tipus de Hardware, és a dir, d'elements físics que formen part d'un sistema informàtic:

1. **Unitats Terminals Remotes (RTU):** Són microprocessadors (ordinadors remots) que obtenen senyals independents d'una acció per a enviar la informació obtinguda remotament perquè es processa. Es connecten a sensors que converteixen els senyals rebuts en dades digitals que ho envien a l'ordinador o sistema de supervisió (MTU). Dintre d'aquesta categoria cal destacar els autòmats programables (PLCs): aquests són utilitzats en el sistema com a dispositius de camp pel fet que són més econòmics, versàtils, flexibles i configurables que les RTUs convencionals.

2. **Sistema de supervisió o MTU** (Maximum Transfer Unit): Normalment es tracta d'un ordinador. Té la funció de recopilar les dades del procés i enviar les instruccions mitjançant una línia de comandaments.
3. **HMI**: És la interfície que connecta a l'home amb la màquina presentant les dades del procés davant l'operari mitjançant un sistema de monitoratge. A més, controla l'acció a desenvolupar a través d'una pantalla, en l'actualitat tàctil.
4. **Xarxa o sistema de comunicació**: S'encarrega d'establir la connectivitat de l'ordinador (MTU) a les RTUs i PLCs. Per a això utilitza connexions via mòdem, Ethernet, Wifi o fibra òptica.
5. **Sensors**: Són dispositius que actuen com a detectors de magnituds físiques o químiques, denominades variables d'instrumentació, i les converteixen en variables o senyals elèctrics.
6. **Actuador**: És un dispositiu mecànic que s'utilitza per a actuar o oferir moviment sobre altres dispositius mecànics.

Als següents apartats es fa una descripció detallada d'aquests elements.

1. PLC (Controlador lògic programable)

L'autòmat programable o PLC la més destacable de les unitats terminals remotes (RTU) i és omnipresent en les indústries de processos d'avui dia. Construït inicialment per a reemplaçar els sistemes de relés electromecànics, ofereix una solució més senzilla per a modificar el funcionament d'un sistema de control. En si mateix, un autòmat programable o PLC és un ordinador robust utilitzat per a l'automatització industrial. Aquests controladors poden automatitzar un procés específic, una funció de la màquina o fins i tot tota una línia de producció, per tant fa tant de RTU com de unitat mestre (MTU).

La majoria dels PLC actuals són modulars, la qual cosa permet a l'usuari afegir una àmplia gamma de funcionalitats que inclouen control discret, control analògic, control PID (calcula la desviació o error entre un valor promig i un desitjat), control de posició, control de motor, comunicació serial i connexió en xarxa d'alta velocitat. En comparació amb tecnologies

anterior, l'autòmat programable és més fàcil de corregir, més fiable, més rendible i molt més versàtil.

Els controladors programables han crescut en totes les aplicacions de control industrial a causa de la comoditat que ofereixen per a la seva posada en marxa: facilitat de programació, facilitat de cablejat, facilitat d'instal·lació i facilitat de canvi. Els PLC abasten una àmplia gamma de grandàries, però tots contenen sis components bàsics:

- 1. Unitat central de processament (CPU):** és el «cervell» del PLC. La grandària i tipus de CPU determina les funcions de programació disponibles, la quantitat de memòria disponible i la velocitat de processament.
- 2. Assemblatge d'entrada/sortida:** Les entrades porten senyals del procés al controlador, poden ser interruptors d'entrada, sensors de temperatura, entrades d'operador, etc. Aquests són com els sensors del PLC. Les sortides són els dispositius que el PLC utilitza per a enviar els canvis a l'exterior. Aquests són els actuadors que el PLC pot canviar per a ajustar o controlar el procés (motors, relés, bombes, etc.). Molts tipus d'entrades i sortides es poden connectar a un PLC, i totes elles es poden dividir en dos grans grups: analògiques i digitals. Les entrades i sortides digitals són les que funcionen a causa d'un canvi de valor discret o binari (on/off, sí/no). En canvi, les entrades i sortides analògiques canvien contínuament en un rang variable: pressió, temperatura i potència.
- 3. Font d'alimentació:** proporciona corrent continu intern per a operar els circuits lògics del processador i els assemblatges d'entrada/sortida. Els nivells comuns d'energia utilitzats són 240 V DC o 120 V AC.
- 4. Unitat de programació, dispositiu o PC/software:** es programa utilitzant software en un ordinador que es carrega al PLC i canvia la lògica de l'interior.
- 5. Assemblatge del bastidor:** també conegut com gabinet o xassís, és la part medul·lar d'un sistema PLC, ja que permeten la connexió física o acoblament a tots els components d'entrada/sortida. Funciona com a bus de comunicació entre aquestes parts.

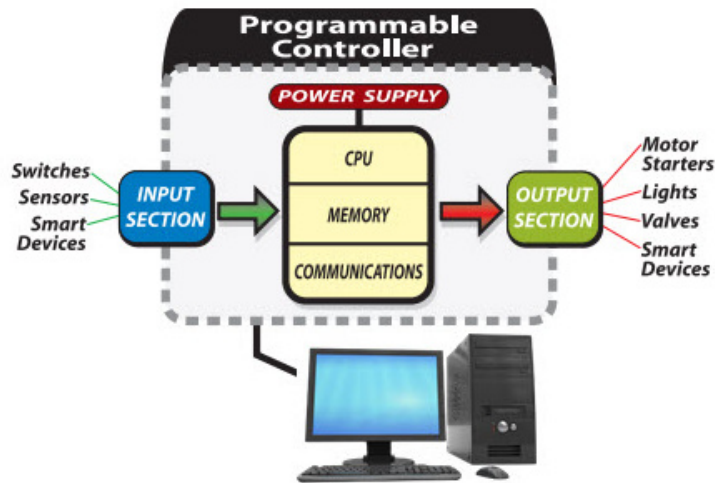


Figura 10. Representació esquemàtica dels mòduls d'un PLC (Aula21, 2020).

En definitiva, l'autòmat programable o PLC rep informació dels sensors o dispositius d'entrada connectats, processa les dades i activa les sortides basant-se en paràmetres programats. Aquest pot monitorar i enregistrar dades de temps d'execució com la productivitat del bioreactor o la temperatura de funcionament, iniciar i detenir automàticament els processos, generar alarmes si aquest no funciona correctament, i més. Els controladors lògics programables són una solució de control adaptable a gairebé qualsevol aplicació.

Els controladors d'ordinadors de sobretaula no han estat generalment acceptats en la indústria perquè funcionen amb sistemes operatius menys estables que els PLC, i perquè el maquinari d'aquests ordinadors no està dissenyat amb els mateixos nivells de tolerància a la temperatura, humitat, vibració i longevitat que els processadors utilitzats en els PLC. En sistemes operatius com Windows, ens trobem que el controlador no sempre pot respondre als canvis d'estat de les entrades amb la consistència en la sincronització que s'espera dels PLC; però, afortunadament, els processos biològics reaccionen de manera lenta en el temps, per la qual cosa no afecta gaire a la mesura. Les aplicacions d'escriptori són utilitzades en situacions menys crítiques, com l'automatització de laboratori i en instal·lacions petites on l'aplicació és menys exigent, ja que generalment són molt menys costoses que els PLC. També es poden emprar microprocessadors amb un cost econòmic més baix, com seria el cas del popular Arduino, tot i que aquests són més susceptibles a interferències i presenten per tant una fiabilitat inferior.

Programació:

Un programa de PLC es codifica normalment en un ordinador i després es descarrega al controlador. Alguns fabricants de PLC subministren programari propi de programació per al control dels seus dispositius de marca.

Referent al llenguatge informàtic, Ladder és el llenguatge de programació tradicional. Imita diagrames de circuits lògics en escala llegits d'esquerra a dreta. Cada esglaió representa una acció específica controlada pel PLC, partint d'una entrada o sèrie d'entrades (contactes) que donen com a resultat una sortida (bobina). A causa de la seva naturalesa visual, Ladder pot ser més fàcil d'implementar que molts altres llenguatges de programació. D'altra banda, el Diagrama de Blocs de Funcions (FBD) és un altre dels llenguatges de programació extensament utilitzat per a PLC. És una forma senzilla i gràfica de programar qualsevol funció de manera conjunta en un programa d'autòmats programables. El diagrama de blocs de funcions és fàcil d'aprendre i ofereix moltes possibilitats.

Normalment aquests aparells són més cars que altres microprocessadors degut a un gran nombre de prestacions i avantatges abans mencionats. Un altre desavantatge és que solen ser de caràcter privatiu, i per tant el fabricant s'assegura el manteniment i actualització del sistema (d'aquesta manera mai s'assoleix el control complet d'aquest per part de l'usuari). No obstant, existeixen algunes alternatives de PLC basades en codi obert bastant populars al mercat, com ara ArduPLC, Industrino o Industrial Shields. A l'apartat de materials es fa una descripció detallada d'una d'aquestes solucions.

2. MTU (Unitat terminal mestre)

És l'element central de supervisió i control d'un sistema d'adquisició de dades. Generalment es tracta d'un mini o microcomputador d'altres prestacions que conté programes d'aplicació específics per dur a terme cadascuna de les tasques de la unitat.

Les seves funcions principals són la recollida de dades i l'enviament de comandes remotes. A més, també s'encarreguen de l'emmagatzematge de data històrica, programació i execució de tasques específiques com ara la realització d'informes, la creació d'alarmes i la comptabilitat de producció. Totes les funcions depenen de les capacitats del seu sistema operatiu.

Segons el sistema, la MTU pot ser físicament un ordinador de taula, un portàtil, un microprocessador o una PLC.

3. HMI (Interfície humà-màquina)

Aquest és el principal recurs a través del qual l'operador és notificat dels canvis en les condicions del procés. Consisteix bàsicament d'un computador personal o d'una pantalla tàctil.

La informació es desplega a la pantalla de l'estació de treball a través d'un programari específic (Annex 1) . Aquest programari presenta a l'operador la informació en diverses formes, tal com gràfics del procés, interruptors digital o comptadors. A més, si fos un requeriment, es poden imprimir informes diaris de les dades així com informes generals de sistema.

4. Xarxa o sistema de comunicació

L'efectivitat i fiabilitat operacional d'un sistema SCADA depèn en gran mesura de la transmissió de dades entre l'estació mestra i les unitats terminals remotes, per tant, ha de ser proveït d'un mitjà a través del qual s'estableixi l'intercanvi de dades entre aquestes unitats d'una manera coordinada, fiable i segura.

Per establir intercanvi de dades entre els dispositius de camp i l'estació mestra només es requereix un mitjà de comunicació, per exemple una línia telefònica, un radi enllaç, un enllaç de microones o satèl·lit, cable coaxial o fibra òptica i un protocol de transmissió de dades. Els fabricants d'equips per a sistemes SCADA fan servir diferents protocols de comunicació i no hi ha un estàndard, però existeixen estàndards internacionals que regulen el disseny de les interfícies de comunicació entre els equips de sistema SCADA i equips de transmissió de dades.

D'acord a l'expressat anteriorment, el sistema de comunicació que forma part d'un sistema SCADA és el conjunt d'elements, dispositius i equips de transmissió de dades a través dels quals es realitza l'intercanvi efectiu de missatges entre les RTUs i la MTU.

Entre els components de sistema de comunicació d'un SCADA típic, es troben les interfícies de comunicació digital, mòdems, mitjans de transmissió de dades, l'ordinador frontal de comunicacions (CFE) i el protocol de comunicació.

- **Interfícies de Comunicació Digital**

Són circuits que permeten interconnectar un equip terminal de dades i un equip terminal de circuit de dades per a la transferència de dades, senyals de control i temporització entre ells. Per tant, és un vincle que permet que senyals digitals passin d'un equip emissor a un altre receptor amb les característiques desitjades.

Una interfície de comunicació digital es caracteritza per un tipus de connector específic (nivell mecànic), tensió i corrents d'operació (nivell elèctric) i una senyalització (nivell lògic). Hi ha un gran nombre d'interfícies estandarditzades, i un exemple d'això és la popular RS-232C (figura 11).



Figura 11. Connector RS-232C
(<https://schniebel.com/KE-572-926/es>)

- **Mòdem**

Un "mòdem" és aquell dispositiu que converteix els senyals digitals provinents d'un equip terminal de dades, en senyals aptes per a ser transmeses eficaçment per a canals de comunicació analògics. Aquests dispositius són precisament utilitzats per interconnectar equips terminals de dades digitals, com ho són les RTUs i l'estació mestra, utilitzant un canal de ràdio o un canal telefònic.

Les funcions bàsiques d'un mòdem són la descodificació i la modulació, i conseqüentment les funcions inverses, descodificació i demodulació. Entre les característiques més importants d'un mòdem està el tipus de modulació que emprava, el tipus de transmissió, el control de flux de dades i la velocitat de transmissió.

- **Mitjans de Transmissió de Dades**

Per tal de dur a terme el diàleg entre equips terminals de dades és el mitjà físic pel qual es propaga la informació, en els sistemes SCADA s'utilitzen diferents mitjans de transmissió:

- Cable de Parell Trenat
- Sistemes d'enllaços de ràdio (VHF, UHF i microones)
- Sistemes basats en xarxes cel·lulars
- Sistemes basats en xarxes satel·litals

- **Processador Frontal de Comunicacions**

S'utilitza en sistemes en els quals un computador central pot tenir connectats un gran nombre d'equips terminals. L'objectiu és que la unitat central de processament de l'equip principal, tingui una menor càrrega de treball.

- **Protocol de Comunicació**

La informació transmesa entre la unitat remota i la unitat mestra va "empaquetada" en un llenguatge i un format conegut tant per l'emissor com pel receptor. És l'única manera que un extrem pugui interpretar correctament els missatges per l'altre extrem.

Perquè pugui tenir èxit la comunicació ha d'haver compatibilitat a dos nivells bàsics: entre senyals elèctrics presents en el mitjà de comunicació i el que es refereix a la interpretació d'aquestes senyals com informació.

Així doncs, un protocol de comunicació és un conjunt de regles i procediments que permet a les unitats remotes i mestra l'intercanvi d'informació.

5. Transductors

Constitueixen els sensors i els actuadors. En tota acció de supervisió i/o control de processos es requereix el maneig de variables d'estat del mateix. Els instruments de camp compleixen amb les funcions de convertir una variable física en un senyal elèctric, dintre d'un rang que pugui ser intel·ligible pel següent element en la cadena d'adquisició d'informació. En general incorporen un element condicionador, que adequa el nivell de tensió o de corrent del senyal de sortida de l'instrument.

El senyal elèctric de sortida d'un instrument pot ser:

- Analògic: de 4 mA a 20 mA, 1 V a 5 V dc, 10 mV a 50 mV, com ara en mesures de flux, pressió i temperatura.
- Digital: 0 V a 24 V DC. Com ara interruptors i estat de bombes.

Les característiques que defineixen la qualitat d'un instrument són:

- Mínima inferència en el procés.

- Exactitud.
- Linealitat.
- Rang d'operació (entrada, sortida, freqüència).
- Estabilitat (susceptibilitat davant vibració, temperatura, humitat, pols, etc.)
- Impedància de sortida.
- Temps de resposta.

En general les potències normalitzades en kW de major ús en els transductors són: 0,5, 1 i 2 kW.

Avui dia, existeix una ampla recopilació d'instrumentació aplicada a digestors tant a nivell industrial com a científic i es classifiquen en tres nivells:

1. Instrumentació bàsica: emprada en instal·lacions reals, de baix cost i manteniment.
2. Instrumentació mitjana: equips d'un cost més elevat però que també es troben en instal·lacions reals.
3. Instrumentació avançada: equips que requereixen d'una major inversió, calibració i manteniment. Emprats en estudis d'investigació a escala pilot o de laboratori.

Instrumentació bàsica (medicions convencionals)	Instrumentació mitjana (medicions assumibles)	Instrumentació avançada (medicions d'alt cost)
<ul style="list-style-type: none"> • Cabal d'alimentació • Cabal de recirculació • pH entrada • pH digester • Temperatura entrada • Temperatura digester • Cabal biogàs 	<ul style="list-style-type: none"> • Composició biogàs (% CH₄, % CO₂) • H₂ en la fase gas • Pressió total en la fase gas 	<ul style="list-style-type: none"> • Alcalinitat total i bicarbonats • AGVs • DQO • SST

Taula 2. Nivell d'instrumentació de digestors anaerobis (REDC, 2016).

Tal i com es pot veure a la taula 2, en les actuals instal·lacions de tractament s'utilitzen amb regularitat sensors per mesurar: pH, cabal de biogàs, temperatura, cabal d'aigua i nivell de líquid al tanc.

4. Materials i mètodes

A continuació es descriuen els elements seleccionats del mercat actual per a dur a terme el disseny de l'automatització d'un bioreactor experimental tipus batch com el amb les característiques del que hi ha instal·lat a Torre Marimon.

4.1 Materials

4.1.1 RTU: PLC basada en Arduino

PLC Arduino ARDBOX 20 I/Os Analog HF Modbus incorpora al seu interior un microprocessador Arduino, una plataforma de creació d'electrònica de codi obert basada en hardware i software lliure, a més de tot un seguit d'elements electrònics que li confereixen moltes prestacions i fiabilitat de mesura. El seu fabricant, Industrial Shields, disposa d'una gran gamma de productes que es poden ajustar a totes les necessitats, i es tracta de la família de PLCs basada en maquinari i programari lliure més reeixida a l'actualitat (Las Heras, 2016).

El motiu principal per qual s'ha escollit un Controlador Lògic Programable en comptes d'un microprocessador de baix cost com Arduino és la seva robustesa davant d'interferències que s'han trobat a l'ambient de laboratori. Sovint provenen del motor de l'agitador ja que, encara que les dimensions del bioreactor siguin de caire experimental, necessita tenir una certa potència per garantir l'homogeneïtat d'aquest.

A la pàgina web d'aquest proveïdor trobem diferents models de PLC, que es classifiquen seguint diferents criteris: número d'entrades i sortides, connectivitat, sistema operatiu, etc.

Aquestes son les característiques per les quals s'ha escollit aquest PLC per al sistema:

- **Autòmat programable basat en Arduino:** disposa de programari open source amb gran quantitat de llibreries i informació a la xarxa.
- **Ampliable.** es pot connectar fins a 127 mòduls el que implica poder disposar fins 2540 entrades/Sortides en connexió Mestre/Esclau mitjançant el bus de comunicacions I²C.
- **Connexió i programació Instantània.** Es programa mitjançant port USB, el que li proporciona un accés instantani tant per programar, realitzar manteniment i preparar-lo per la seva posada en marxa.

- **Mòduls estandarditzats.** Els diferents mòduls disponibles a la família ARDBOX es programen exactament de la mateixa manera. Un cop s'hagi utilitzat un equip es podran configurar amb la mateixa metodologia.
- **Flexible i dinàmic.** Tots els components es poden configurar tant per efectuar el seu treball com a Mestre o com Esclau.
- **20 entrades/sortides analògico-digitals configurables.** Les entrades es configuren a través del programari i les sortides mitjançant 'jumpers' o ponts.

E/S Analògiques	E/S Digitals
La variació de voltatge entre -Vcc (o GND) i + Vcc , pot prendre qualsevol valor.	Variació de tensió de -Vcc (o GND) a + Vcc , sense valors intermedis.
Una entrada analògica proporciona una mesura codificada en forma de valor digital amb un nombre de N bits.	Dos estats: 0 (-Vcc o GND) i 1 (+ Vcc) .
Van de 0 a 10 V dc.	Van de 5 a 24 V dc.
	Intensitat màxima 0,3A.

Taula 3. Rang de tensions en entrades i sortides digitals i analògiques (Industrial Shields, 2020)

La majoria d'entrades i sortides permeten ser desconnectades, amb la qual cosa no es produeix l'efecte antena i per tant es redueixen les interferències, i moltes d'elles incorporen auto-aïllament. Això permet connectar-les en una font d'alimentació diferent de la de 24 V, ja que l'ARDBOX en té dues: la primera d'elles s'utilitza per a la lògica, que admet de 12 a 24 volts, i la segona (V_{in}) s'utilitza per a les E/S aïllades.

Una altra característica interessant d'aquest PLC és que presenta una estructura física que el permet ser col·locat en un carril DIN, i per tant facilita el muntatge d'un armari elèctric. També és destacable que l'apartat de comunicacions es disponible a l'exterior mitjançant diversos connectors.

4.1.2 HMI: Ordinador portàtil amb Labview

LabView és un entorn gràfic de programació que permet desenvolupar sistemes d'instrumentació virtual. S'ha escollit aquest software per a realitzar la Interfície Humà-Màquina per un motiu principal: la seva programació està basada en diagrames de blocs intuïtius que fa que sigui accessible per a usuaris amb un nivell informàtic bàsic. Aquests diagrames es realitzen enllaçant els anomenats 'instruments virtuals', una representació

gràfica de l'instrument de mesura real. A més, aquest entorn virtual disposa de biblioteques integrades i específiques per a funcions de programari d'enginyeria. Un altre motiu és que National Instruments, el fabricant d'aquest software, ofereix llicència gratuïta a estudiants d'enginyeria, amb la qual cosa s'ha pogut fer ús del seu software per a la realització d'aquest treball sense cost afegit.

Tot i que aquest software està capacitat per a realitzar la funció de control de la RTU, també es pot emprar només com a Interfície Humà-Màquina. D'aquesta manera la fiabilitat de les mesures dependran de la PLC, un Hardware més robust i preparat per a realitzar aquesta funció que un ordinador de sobretaula o portàtil.

4.1.3 Sensors

Tal com s'ha descrit a l'apartat de paràmetres ambientals i d'operació, hi ha tot un seguit de variables que es poden supervisar i sovint controlar per tal de mantenir el bon funcionament del bioreactor. Algunes d'aquestes variables només es poden quantificar amb maquinària sofisticada de laboratori, com ara la composició exhaustiva del residu a tractar, mitjançant tècniques d'espectroscòpia, cromatografia i PCR entre altres. No obstant, es poden emprar sensors per a mesurar altres variables més senzilles que també donen informació sobre el procés, com ara el pH, el potencial Redox, la temperatura, el temps de retenció hidràulic o la quantitat de biogàs produït.

A continuació es fa una breu descripció d'alguns dels sensors que hi ha al mercat per quantificar aquestes variables i les seves característiques electròniques bàsiques per a poder-los connectar amb el PLC.

4.1.3.1 Sensor de Temperatura

Hi ha diferents sensors de temperatura al mercat compatibles amb la tecnologia Arduino. La majoria s'utilitzen per a mesurar la temperatura de l'aire, però també trobem sondes impermeables que ens permeten mesurar la temperatura en líquids i altres tipus de gas.

Un d'ells és el sensor *DS18B20* de la companyia Maxim Integrated, que a més de ser econòmic és prou avançat: disposa d'un rang ampli de mesurament de -55 °C a + 125 °C i una precisió superior a $\pm 0,5$ °C en el rang -10 °C a +85 °C. En aquesta aplicació no cal afinar més ja que els

bioreactors operen en règim mesòfil i pot variar d'un graus a l'alça o a la baixa sense que hi hagi cap alteració.

A més a més, aquesta sonda proporciona la sortida d'informació mitjançant un bus de comunicació digital que pot ser llegit amb les entrades digitals de la PLC basada en Arduino. Ho fa gràcies a que incorpora un convertidor analògic-digital. Aquest bus denominat 1-Wire, necessita un únic conductor per fer la comunicació (sense comptar el conductor de terra). Els dispositius poden ser alimentats directament per la línia de dades, o mitjançant una línia addicional amb una tensió de 3 V a 5,5 V. Dins el mateix bus podem instal·lar tants sensors com desitgem. A més, aquesta tecnologia permet emprar cables més llargs que altres sistemes abans que es deteriori la comunicació. També disposa d'un sistema d'alarma que permet gravar en la memòria no volàtil de l'DS18B20 els límits inferiors i superiors.

Per a ser connectar a la PLC, requereix una resistència de pull-up de 4 k Ω entre 5 V i Vin perquè funcioni correctament. A la següent figura es pot veure l'esquema de connexió d'aquesta sonda.

Nota: els esquemes de connexions s'han realitzat amb una placa Arduino Leonardo ja que és el microprocessador que conté la PLC ARDBOX al seu interior, i tot i que les connexions son les mateixes d'aquesta manera es poden representar de manera més visual.

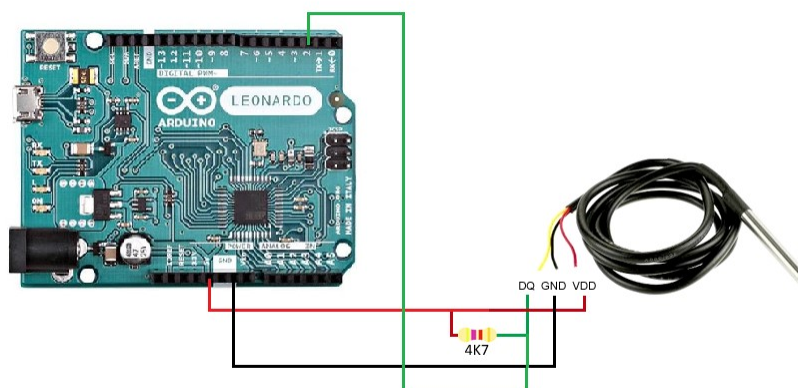


Figura 12. Connexió del sensor de temperatura DS18B20 a la PLC basada en Arduino. Imatge original Llamas, 2016.

Com es pot veure a la imatge, els dispositius 1-Wire disposen de tres terminals:

- Dq, la línia de dades

- Vcc, línia d'alimentació
- GND, línia de terra

4.1.3.2 Sensor ORP

La mesura del potencial redox és anàloga a la mesura de pH. A diferència d'un sensor de pH que segueix una corba logarítmica i, per tant, requereix més ajustos de calibratge, l'ORP segueix una relació lineal i no necessita d'ajust o molt manteniment de l'elèctrode.

Per a realitzar aquesta mesura també hi ha un extens catàleg de sensors. Per a fer la presentació d'aquest tipus de transductor s'ha escollit el model SEN0165 Analog ORP Meter, ja que és un mesurador de potencial redox analògic dissenyat especialment per als controladors Arduino. Aquest està compost per un elèctrode d'or o platí i un mòdul electrònic, que dona la mesura en mV en un rang de -2000 mV a 2000 mV. Tal i com s'ha vist a l'apartat de paràmetres ambientals, -300mV és la mesura a la qual es dona satisfactòriament la digestió anaeròbia.

Les seves especificacions tècniques són:

- Tensió d'alimentació: + 5 V
- Rang de mesura: -2000mV - +2000mV
- Rang de temperatura: 5°C - 70 °C
- Incertesa: ± 10 mV (25 °C)
- Temps de resposta: ≤ 20 seg

Per obtenir una comunicació amb el sensor analògic es realitza utilitzant solament un cablejat a un port analògic de la PLC basada en Arduino, facilitant així la seva operativitat a diferència de mesuradors de ORP tradicionals ja que són difícils d'obtenir o utilitzar. Les connexions d'aquesta sonda amb la PLC es realitzen seguint el següent esquema:

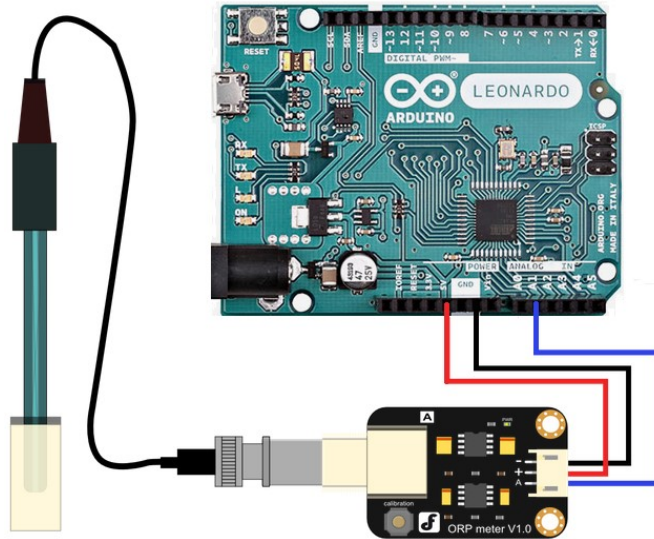


Figura 13. Connexió de la sonda SEN0165 Analog ORP Meter a la PLC basada en Arduino. Imatge original Llamas, 2016.

4.1.3.3 Cabalímetre

Hi ha paràmetres operacionals que depenen directament del cabal d'entrada al bioreactor, com és el TRH, el TRC i l'OLR. No obstant són paràmetres a controlar en bioreactors que operen en continu, ja que als tipus batch el TRH correspon amb el temps total de reacció i TRC i OLR són mesures derivades de la primera.

Si s'hagués d'incorporar aquestes mesures al sistema degut a que s'opera en continu, es faria connectant un cabalímetre a la PLC. L'única premissa és que el residu ha de ser suficientment líquid i ha d'entrar filtrat per a no obstruir les canonades del cabal d'entrada al digestor.

Amb el cabalímetre es mesura la quantitat d'influent que travessa una canonada per unitat de temps. Les unitats en el sistema internacional són m^3/s , sent altres unitats habituals l/s i l/min. El cabal depèn de diversos factors, principalment de la secció de canonada i la pressió de subministrament.

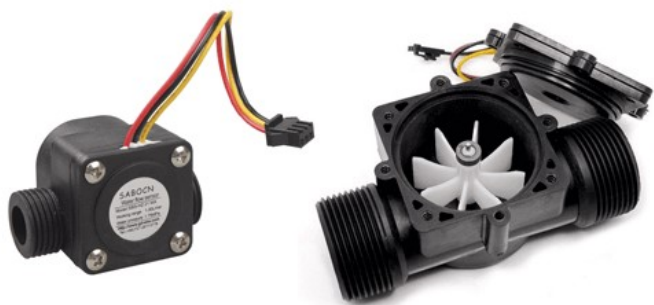


Figura 14. Cabalímetre YF-S201 de la marca Sabdon 1-30L/min

El principal criteri de selecció d'un cabalímetre recau en el diàmetre de la canonada.

En general, els cabalímetres estan constituïts per una carcassa plàstica estanca i un rotor amb paletes al seu interior. Al travessar el fluid l'interior del sensor, el cabal fa girar el rotor. La velocitat de gir es determina mitjançant un imant fixat a el rotor, que és detectat mitjançant un sensor 'hall' extern a la carcassa. Per tant, cap part elèctrica està en contacte amb el fluid.

La sortida del sensor és una ona quadrada la freqüència de la qual és proporcional al cabal travessat.

$$f (Hz) = K \cdot Q (l/min) \Rightarrow Q (l/min) = \frac{f(Hz)}{K}$$

El factor K de conversió entre freqüència (Hz) i cabal (L/min) depèn dels paràmetres constructius del sensor. El fabricant proporciona un valor de referència. No obstant això, la constant K depèn de cada cabalímetre. Amb el valor de referència podem tenir una incertesa de $\pm 10\%$. Si volem una precisió superior haurem de realitzar un assaig per calibrar el cabalímetre.

Model	Connexió	Cabal	k
YF-S201	1/2"	1-30 L/min	7,5
FS300A	3/4"	1-60 L/min	5,5
FS400A	1"	1-60 L/min	3,5

Taula 4. Especificacions tècniques de 3 models de cabalímetre diferents (Llomas, 2016)

La connexió del cabalímetre és molt senzilla. D'una banda s'alimenta el sensor connectant Vcc i GND, respectivament, a 5V i GND en la PLC. D'altra banda, connectem la sortida del sensor SIG a un pin digital que permeti emprar interrupcions.

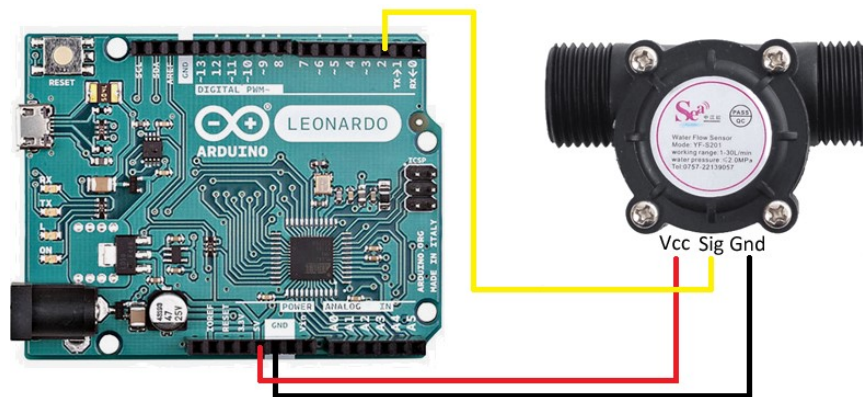


Figura 15. Connexió del cabalímetre YF-S201 a la PLC basada en Arduino. Imatge original Llamas, 2016.

4.1.3.2 Sensors de nivell

Malgrat que els sensors de nivell no s'encarreguen de quantificar un paràmetre ambiental o operacional, són necessaris per a automatitzar el procés d'ompliment i buidatge del reactor.

Hi ha diferents tipus de sensors que fan aquesta funció, com per exemple de boia, de resistència elèctrica o capacitius. Tots funcionen com un interruptor que s'obre si es troba en absència d'aigua i es tanca en el cas contrari o viceversa.

S'ha seleccionat per a aquesta aplicació el sensor de nivell XKC-I25-T12V. És un sensor de proximitat no invasiu de tipus capacitiu. Aquests tipus de sensors de nivell són interessants ja que no necessita estar en contacte amb el líquid perquè mesura la seva presència des de fora de l'envàs. Això el fa especialment interessant per temes d'higiene i manteniment, ja que el sensor es podria malmetre al entrar en contacte amb substàncies corrosives. A més, d'aquesta manera no cal passar cablejat fins a l'interior del digestor.

Un altre avantatge és que és molt senzill d'utilitzar amb plataformes com Arduino i s'acompanya d'una placa d'interfície amb un polsador que permet establir fins a tres nivells de sensibilitat. Inclou el sensor, placa amplificadora i cable de connexió.

Quan el líquid passa a el nivell del sensor, la seva capacitància paràsita s'acobla al camp elèctric generat pel sensor, això és detectat pel sensor capacitiu i processat com a presència de líquid. Es pot ajustar la sensibilitat retirant la tapa posterior i ajustant el potenciómetre amb un tornavís, girar en sentit horari per disminuir la sensibilitat i en sentit antihorari per augmentar la sensibilitat. La sortida del sensor es pot invertir. El digestor no ha de ser de material metàl·lic per no bloquejar el camp elèctric detectable, és recomanable utilitzar materials plàstics o

vidre. Per enganxar el sensor al bioreactor es pot utilitzar cola de mucíl·lag, una substància vegetal viscosa i fortament adherent.

Les seves especificacions tècniques són:

- Alimentació: 5 V a 24 V
- Consum: 5 mA
- Sortida de voltatge (nivell alt): In Vcc
- Sortida (nivell baix): 0 V
- Corrent de sortida: 1 mA a 50 mA
- Temps de resposta: 500 ms
- Temperatura de funcionament: 0°C a 105°C
- Sensibilitat segons gruix de paret: 0mm a 13 mm
- Humitat: 5 % a 100 %
- Material: ABS
- Grau de protecció IP: IP67
- Dimensions: 28 x 28 mm

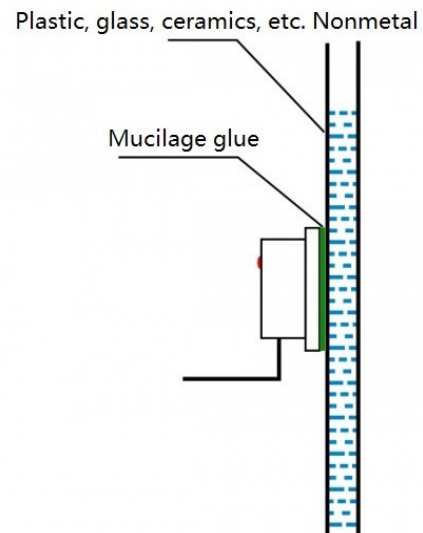


Figura 16. Esquema d'aplicació del sensor de nivell XKC-I25-T12V (Llamas, 2016).

La connexió és molt senzilla, es pot veure al següent esquema:

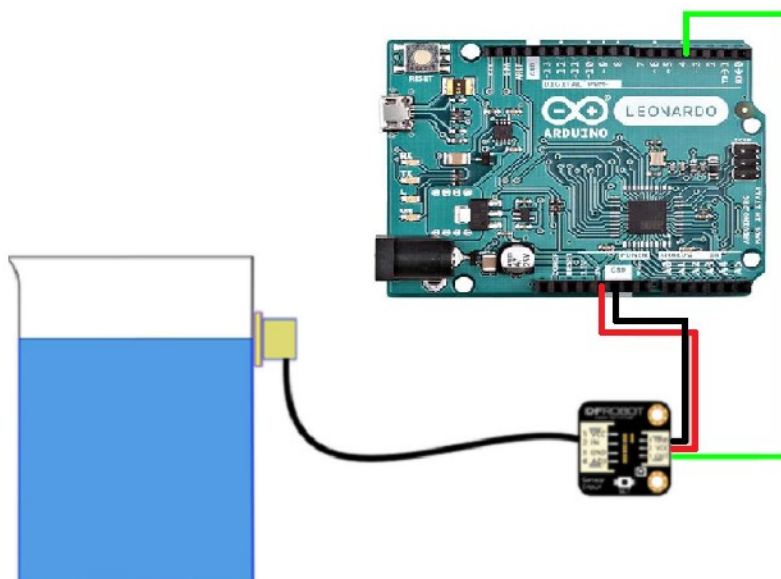


Figura 17. Connexió del sensor de nivell XKC-I25-T12V a la PLC basada en Arduino. Imatge original Llamas, 2016.

4.1.4 Relés

Un relé és un dispositiu electromecànic que permet a un processador com Arduino controlar càrregues a un nivell tensió o intensitat molt superior a les que la seva electrònica pot suportar. Les sortides per relé són molt freqüents en el camp de l'automatització de processos, i gairebé tots els autòmats inclouen sortides per relé per accionar càrregues com motors, bombes, climatitzadors, il·luminació, o qualsevol altre tipus d'instal·lació o maquinària.

Físicament un relé es comporta com un interruptor "convencional" però que, en lloc de accionar manualment, és activat de forma electrònica. Els relés són aptes per accionar càrregues tant de corrent altern com contínua.

Un relé disposa de dos circuits:

- El circuit primari rep el senyal de l'electrònica de baixa tensió i està format per una bobina enrotllada a un nucli metàl·lic, formant un electroimant.
- El circuit secundari és l'interruptor encarregat d'encendre o apagar la càrrega (proporciona alimentació a aquesta). Està format per uns contactes elèctrics instal·lats en làmines de metall flexible.

Al tractar-se de dispositius electromecànics que requereixen el moviment de components interns per al seu funcionament, el temps de commutació d'un relé és elevat, de l'ordre de 10ms.

La vida útil del dispositiu està determinada pel nombre de commutacions. No obstant això, típicament és de l'ordre de 100.000 a 1.000.000 commutacions pel que en un ús normal són components duradors i fiables.

Sempre que sigui possible triarem muntatges amb optoacoblador. Aquest és un dispositiu que aïlla galvànica

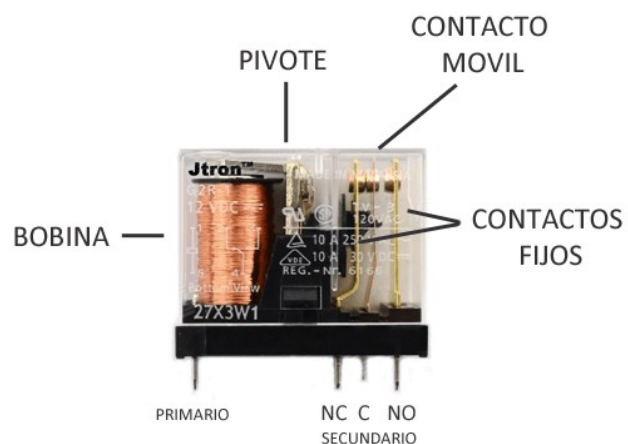


Figura 18. Parts d'un relé electromagnètic (Llamas, 2016).

el circuit primari i secundari, fet que suposa una protecció addicional per la PLC davant d'una fallada catastròfica a la placa del relé.

Els relés normalment disposen de tres contactes en el secundari: C (comú), NO (normalment obert) i NC (normalment tancat). Però també trobem models que prescindeixen de la terminal NC.

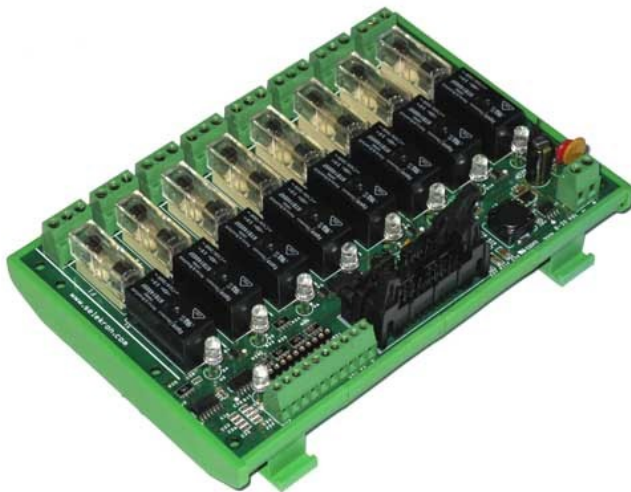


Figura 19. Mòdul de 8 relès de la marca Selektion (Selektion, 2015).

Quan s'activa el relé, el corrent circula per la bobina del circuit primari generant un camp magnètic que fa pivotar una armadura, que al seu torn empeny a el contacte mòbil, tancant el circuit amb el contacte fix NO. Mentrestant, es separa i obre el circuit amb el terminal NC. Quan el corrent del circuit primari cessa, el contacte mòbil torna a la seva posició original obrint el circuit amb el terminal NO i tancant amb el terminal NC. Per tant, per controlar la càrrega amb un relé com si fos un

interruptor, sempre connectarem un dels pols a la terminal C (comuna), que està unit al contacte mòbil del secundari. L'altre pol de la càrrega haurem connectar-lo a un dels terminals NO o NC, en funció de si volem que al funcionar el relé el circuit es tanqui (càrrega encesa) o s'obri (càrrega apagada).

Per realitzar aquest projecte s'ha emprat un mòdul de 8 relés equivalents al model SKM-RLY08062F de la marca SELEKRON, amb fusibles de protecció integrats i carcassa compatible amb carrin DIN (figura 19).

L'esquema de connexions amb la PLC es correspondria amb el següent:

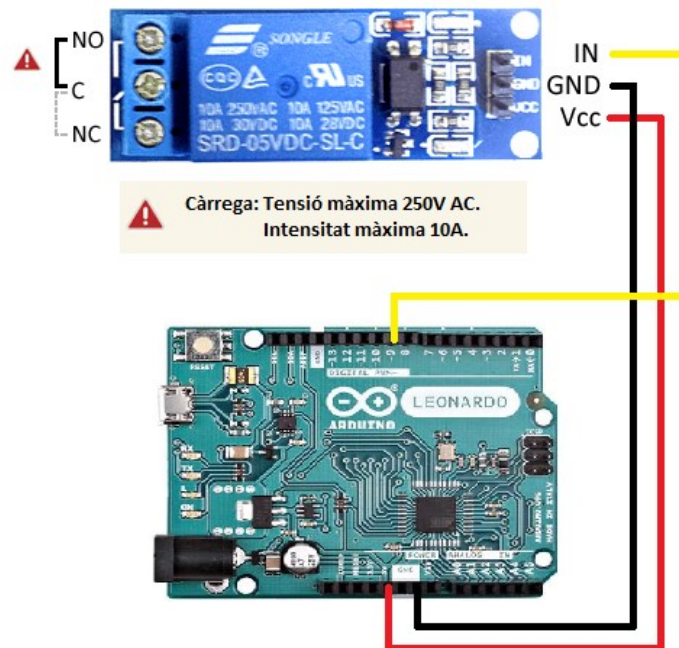


Figura 20. Connexió del relé a la PLC basada en Arduino. Imatge original: Llamas, 2016.

4.1.5 Actuadors

4.1.5.1 Bombes d'ompliment i buidatge

El digester experimental requereix d'una bomba amb un cabal necessari per omplir/buidar un volum d'uns 4-5 L. És per aquest motiu que s'han seleccionat dues bombes peristàltiques de 12 V amb una cabal màxim de 4 L/min i un desnivell màxim de 3m que es connecten amb la regleta de relés i la font d'alimentació externa. També poden ser seleccionades bombes amb una potencia nominal superior (Camarasa, 2018) per a dur a terme l'emplenat en menys temps. És important que aquestes siguin submergibles, ja que el fluid podria malmetre la bomba i provocar curtcircuits. A les bombes submergibles el motor es troba encapsulat en una cavitat segellada.



Figura 21. Bomba De Agua Sumergible 12V 3M 240L/H (Llamas,2016)

Un avantatge d'aquestes bombes és el baix nivell de soroll (inferior a 35 db). També permet treballar amb fluids amb un ampli rang de pH, permetent treballar amb residus orgànics, i té una llarga vida útil.

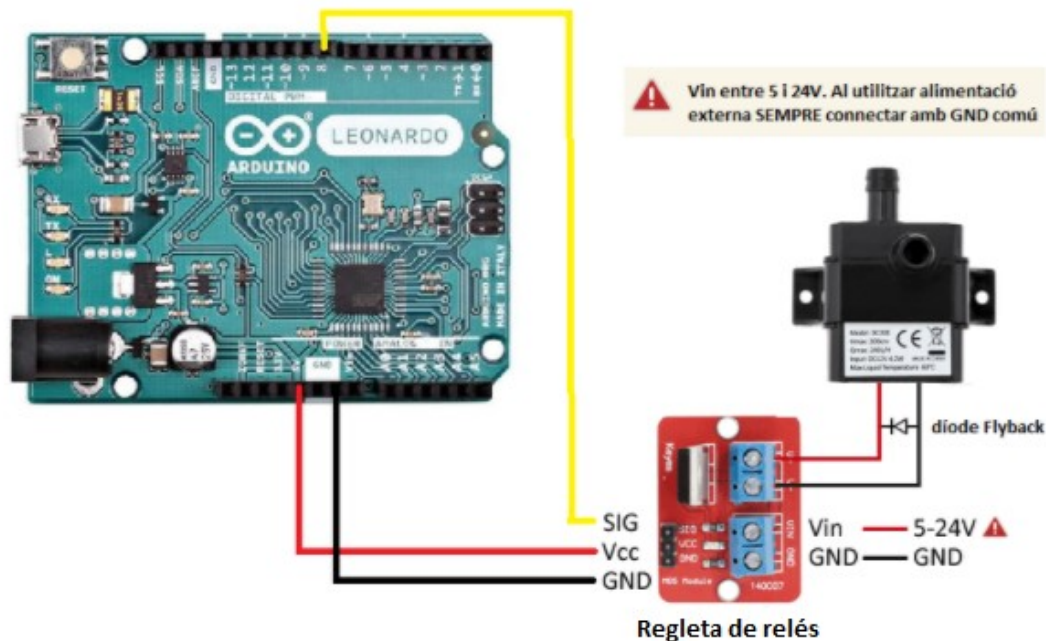
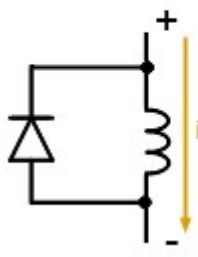


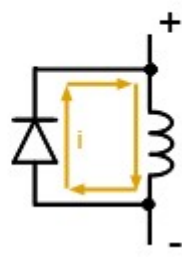
Figura 22. Connexió de la bomba peristàtica a la PLC basada en Arduino. Imatge original: Llamas, 2016.

Una bomba, llevat que estigui internament compensada, és una càrrega inductiva. Per tant,

FUNCIONAMENT
NORMAL



FUNCIONAMENT
AL DESCONNECTAR



s'ha d'afegir un díode de protecció *flyback*.

Aquest és un díode de retorn que s'utilitza per

eliminar el retorn, que és el pic de voltatge sobtat

que s'observa en una càrrega inductiva quan el

seu corrent de subministrament es redueix o

s'interromp sobtadament. D'aquesta manera

permet dissipar els corrents induïts produïts pel

camp magnètic de la bomba malmetre

l'actuador.

Figura 23. Esquema de funcionament d'un relé electromagnètic (Llamas, 2016).

4.1.5.3 Agitador

Segons bibliografia (Muqeet et al., 2015), s'ha emprat un agitador per a un bioreactor de característiques similars de material plàstic amb 4 pales i un diàmetre de fulla de 5 cm amb resultat satisfactori. Aquest empra motor de corrent continu amb una potència nominal de 100 RPM / 12 V DC. Les connexions es corresponen amb les de l'apartat anterior però sense necessitat d'incorporar díode.

4.1.6 Font d'alimentació



Figura 24. Font d'alimentació de 24 V amb adaptació a carril DIN (RS Components, 2020).

Es necessita font d'alimentació per tal d'alimentar tots els elements que es connectin a una tensió superior a 5 V (sortida de voltatge de la PLC), que en aquest disseny de sistema serien els actuadors: bombes, agitador i manta calefactors i la mateixa PLC.

S'ha seleccionat una bateria del proveïdor MEAN WELL amb una sortida de 24 V dc, 630 mA i 15,2 W de potència amb capacitat d'ancoratge a carril DIN.

- Tensió d'entrada: 85 V a 264 V AC i 123 V a 370 V DC.
- Tensió de sortida: 21,6 V a 29 V.
- Compta amb protecció enfront curtcircuits, sobrecàrrega, excés de temperatura o sobretensió.

4.1.7 Altres elements

4.1.7.1 Carrils DIN

Un carril DIN és una barra de metall normalitzada. És molt usat per al muntatge d'elements elèctrics de protecció i comandament, tant en aplicacions industrials com a habitatges. En aquesta aplicació es

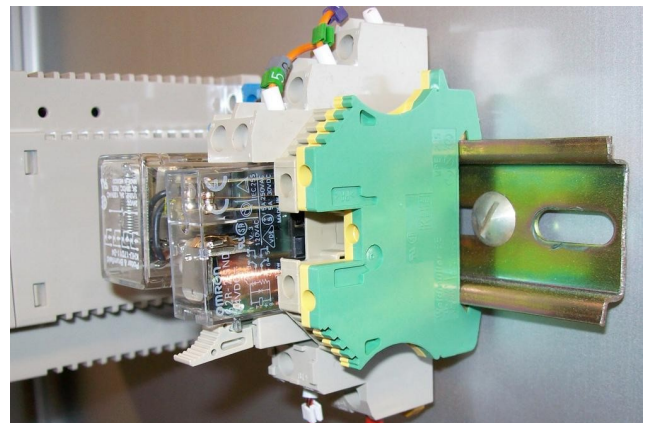


Figura 25. Elements elèctrics sostinguts a un carril DIN (Wikipedia, 2020)

requereixen de manera aproximada 3 carrils d'un 30 cm de longitud cadascun per tal d'allotjar els diferents elements electrònics del sistema.

4.1.7.2 Blocs terminals amb bornes de connexió

Son peces universals que combinen materials plàstics i metàl·lics. S'utilitzen per a endreçar i unificar el cablejat d'un sistema electrònic instal·lat a un carril DIN. Sovint son de diferents colors per a identificar fàcilment el cablejat. Es pot observar un exemple de bloc emprat en connexions a terra a la figura 25.

4.1.7.3 Interruptor general

És un dispositiu electromecànic que es col·loca en les instal·lacions elèctriques de corrent altern per tal de protegir les persones d'accidents provocats pel contacte amb parts actives de la instal·lació (contacte directe) o amb elements sotmesos a potencial a causa, per exemple, a una derivació per falta d'aïllament de parts actives de la instal·lació (contacte indirecte). També protegeixen contra els incendis que poguessin provocar aquestes derivacions.

4.1.7.4 Manta calefactora

El digestor s'ha de mantenir en un règim mesòfil (entre 20 °C i 40 °C) per tal de que els microorganismes puguin realitzar les funcions metabòliques que permeten l'obtenció de biogàs. La temperatura exacta dependrà del tipus de residu a tractar i, per tant, de les seves poblacions de bacteris. Sovint aquesta temperatura establerta és superior a la temperatura ambient de la sala on es troba el bioreactor, i en aquests casos s'haurà de fer servir un sistema de transferència de calor. Segons fonts bibliogràfiques (Montiel, 2015), és preferible incorporar una manta calefactora davant d'altres sistemes calefactores degut a l'homogeneïtat en el repartiment de la calor. Aquestes mantes normalment van connectades a una tensió de 230 V i tenen termòstat integrat, amb la qual cosa només caldria connectar-la a la xarxa.



Figura 26. Interruptor general amb adaptació a carril DIN (wikipedia, 2020).

4.1.7.5 Connectors de potència industrial

Per tal de reunir en un mateix punt tots els elements electrònics i elèctrics del sistema, s'afegeixen connectors de xarxa a l'armari de connexions. El nombre d'endolls dependrà del requeriments del digestor i, per tant, del nombre d'elements que calgui connectar a 230 V.

En aquest sistema només caldrà connectar una manta calefactors que mantingui el bioreactor en règim mesòfil, ja que la resta de transductors que requereixen un voltatge d'entre 5 V i 24 V poden ser alimentats per la font d'alimentació externa. Aquests connectors s'instal·len foradant l'armari metàl·lic en un lateral o a la mateixa porta.



Figura 27. Connector de xarxa amb tapa protectora (Wikipedia, 2020).

4.1.7.6 Armari de connexions elèctriques

Per a recollir i endreçar tota l'electrònica emprada en aquest sistema de supervisió i control del digestor experimental es fa servir un armari de connexions metàl·lic de dimensions adequades al seu contingut. A continuació es fa un llistat del mateix:

- Carrils DIN
- Interruptor general
- Font d'alimentació externa
- PLC
- Regleta de relés
- Blocs terminals
- Endolls connectors

La resta de components es connecten a la regleta de relés o bé als endolls.

4.2 Mètodes

4.2.1 Especificacions funcionals

El primer pas per a dissenyar un sistema d'automatització i control és definir les prestacions amb les que aquest ha de comptar. Sovint és el client qui marca aquestes especificacions en funció de les seves necessitats. En aquest treball ha sigut el tutor qui ha marcat aquestes

especificacions, basant-se en les necessitats del projecte OPRENAC, mencionat a la introducció d'aquest document.

Els requeriments del client van ser:

- Emplenat i buidat del bioreactor de forma autònoma.
- Controlar en tot moment la temperatura del procés.
- Fer un registre de la producció de biogàs.
- Comptar amb una interfície que permeti a l'usuari veure l'estat del bioreactor i les seves variables a temps real.
- Disposar d'un armari de connexions per tal de que el cablejat romanguí endreçat.

4.2.2 Diagrama i simplificació del procés

Per a fer el diagrama Grafcet del procés (annex 2), aquest s'ha desglossat amb estructura de màquina d'estats, on les sortides depenen únicament de l'estat on es troben i cada estat compta amb un senyal per a passar a la següent fase o estat:

1. **Emplenat.** S'inicia el procés amb l'activació de la bomba d'emplenat i finalitza quan el sensor de nivell superior detecta presència de líquid. En aquest punt la PLC envia dos senyals: un al relé connectat a la bomba d'emplenat per tal d'aturar-la i un segon al relé connectat a l'agitador per activar-lo. En aquest moment comença la segona fase.
2. **Producció.** En aquest punt comença l'activitat metabòlica i la conseqüent producció de biogàs. És l'etapa més extensa i pot durar de dies a mesos segons les dimensions del digestor.

Una de les mesures indispensables a realitzar durant aquesta fase és mesurar la temperatura a la que opera el bioreactor, ja que les poblacions bacterianes són especialment sensibles a aquest paràmetre (apartat 3.3.1). Es poden fer lectures de temperatura en intervals relativament llargs de temps, ja que les variacions de les reaccions bioquímiques que es duen a terme són lentes i graduals. D'aquesta manera es podria escollir un interval de mesura de, per exemple, un minut.

De la mateixa manera podríem connectar a la PLC un sensor de pH ja que, com s'ha explicat a l'apartat 3.2.1., dependent del residu caldrà monitoritzar el pH per regular-lo.

A més, les mesures de pH són indispensables quan el bioreactor permet separar físicament les fases o etapes i cadascuna es dóna diferent rang de pH.

En aquesta fase també seria interessant disposar d'un gasòmetre equivalent al proposat al punt 4.2.5 d'aquest document. D'aquesta manera es podria mesurar la producció de biogàs i també la seva velocitat si incorporem a aquest un rellotge. A més, es poden configurar alarmes en el cas de que el cabalímetre detectés una disminució del biogàs, ja sigui perquè els microorganismes han esgotat el medi o perquè hi ha hagut un desequilibri en les reaccions.

No cal mesurar el TRH i TRC perquè en digestors tipus batch es correspon al temps total de reacció ja que la biomassa roman allà fins al final del procés.

El procés de producció finalitza quan la mesura de biogàs es troba per sota d'un llindar, en el cas de comptar amb el gasòmetre, o bé quan hagi transcorregut el temps programat. Qualsevol d'aquests senyals aturarien l'agitador.

3. **Sedimentació.** En aquesta fase, la biomassa precipita en absència d'agitació per tal de separar el clarificat dels llots amb la finalitat de buidar la part líquida i reutilitzar la biomassa. En el cas de que aquest es vulgui retirar, s'haurà de fer de manera manual a l'etapa neteja. La sedimentació acaba quan finalitza el temps preestablert.
4. **Buidat.** Una vegada finalitzat el temps de sedimentació s'activa la bomba de buidat fins que el sensor de nivell inferior detecta absència de líquid.
5. **Neteja.** A continuació l'usuari hauria de poder escollir si cal fer neteja o no del digestor. En cas afirmatiu es disposa d'un temps preestablert per realitzar-la després del qual començaria de nou el procés. Si l'usuari escull a la interfície d'usuari que no cal realitzar la neteja es passaria automàticament a la fase número 1.

4.2.3 Muntatge de l'armari elèctric

L'esquema de l'annex 3 presenta un exemple de muntatge elèctric per a l'automatització d'un digestor experimental tipus batch. A grans trets, els elements que componen aquest sistema són: un armari de connexions elèctriques, un ordinador portàtil amb la interfície d'usuari, un digestor anaerobi experimental tipus batch i els transductors (sensors i actuadors en el seu conjunt).

Com es pot observar a la figura, l'armari incorpora al seu interior l'electrònica del sistema: un interruptor general, el transformador de tensió, una font d'alimentació de 24 V, la PLC i una regleta de relés. Inicialment el sistema s'alimenta a 230 V que es transformen en 24 V per alimentar la PLC, l'agitador i les bombes d'emplenat i buidat. L'únic que es connecta directament a 230 V és la manta calefactora que recobreix el bioreactor degut a la seva potència.

Els sensors van connectats directament a la PLC, mentre que els actuadors es connecten a la regleta de relés per controlar la seva activació. Els primers són fàcilment ampliables mentre que els segons depenen del nombre de relés que tingui el mòdul instal·lat.

4.2.4 Programació

Tal i com s'ha dissenyat aquest sistema, la programació principal recau sobre la PLC, ja que fa la funció de controlador. No obstant, interfície d'usuari també requereix ser programada per tal de reflectir en pantalla les dades que proporciona l'RTU.

En primer lloc s'ha de connectar la PLC a un PC amb un software que permeti introduir en aquesta les ordres que haurà de seguir el bioreactor. Industrial Arduino IDE és la plataforma original per programar plaques Arduino, i per tant es fa servir per programar la PLC ja que el seu microprocessador és una placa Arduino Leonardo. Aquesta aplicació multiplataforma està disponible per a diferents sistemes operatius i compta amb un públic molt ampli, pel que hi ha molta informació i formació disponible a la xarxa.

Tal i com s'observa a l'annex 2, es simplifiquen les etapes del bioreactor tipus batch com si es tractés d'una màquina d'estats, és a dir, on les sortides estan determinades per l'estat actual únicament (i no depèn directament de l'entrada). Aquest inclou un senyal de sortida per a cada estat.

4.2.4.1 Programació PLC

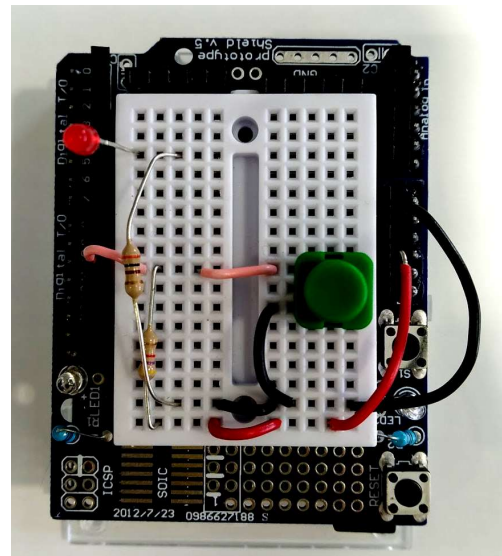


Figura 28. Placa Elegoo (equivalent a Arduino) amb el muntatge simplificat del procés del digester.

Degut a la impossibilitat de realitzar aquesta posada en funcionament de manera pràctica, s'ha realitzat un prototip amb Arduino per tal de fer verificacions de codi (figura 29) ja que la PLC incorpora una unitat Arduino Leonardo i el llenguatge seria equivalent al requerit per la placa PLC industrial.

En aquesta representació s'ha simulat el funcionament dels sensors amb un interruptor. D'aquesta manera, si s'acciona l'interruptor és com si el sensor hagués canviat el seu estat o hagués arribat a una mesura llindar i enviés un pols de 5V a la placa Arduino, que equival al pols elèctric que es rebria a la PLC en cas d'utilitzar qualsevol sensor connectat a una entrada digital. Per altra banda, s'ha simulat el comportament dels actuadors amb un LED que s'encén o s'apaga en funció de si l'actuador està operatiu o no. En aquesta simulació, l'interruptor representa el sensor de nivell superior i el LED la bomba d'emplenat. No obstant, el codi (annex 4) s'ha elaborat com si tinguéssim connectats tots els sensors i actuadors que s'han seleccionat per der el disseny del muntatge, sols que programant els sensors com a polsadors i els actuadors com a LEDs que s'encenen en resposta a l'estímul del sensor.

4.2.4.2 Programació Interfície d'usuari

Tal com s'ha descrit a l'estudi previ, la interfície humà-màquina té com objectiu posar en contacte a l'operador del bioreactor amb l'evolució del sistema. Es per això que aquesta ha d'incloure indicadors de les diferents fases del procés i altres elements visuals d'interès per als operaris o investigadors. Per a dur a terme la interfície s'ha proposat el software LabView degut a la seva programació basada en elements gràfics i a un ampli ventall de funcions que s'adapten a l'automatització i control de processos. El software en qüestió consta de dues parts, per una banda la part visual que representarà el procés (figura 30), i per l'altra un full de programació on, mitjançant diagrama de blocs, es criden els valors de lectura de la PLC.

Cal mencionar que, malgrat que el codi és intuïtiu i visual, ha de ser desenvolupat per un informàtic degut a l'alt domini informàtic que es requereix per a elaborar estructures de codi complexes. L'enginyer de Sistemes Biològics s'encarrega de definir les prestacions de la interfície i del sistema en general per tal de satisfer la demanda del client.

Es pot observar a la figura 30 un exemple d'interfície d'usuari per a un digester anaerobi com el que es troba a torre Marimon. El elements que aquest incorpora son els següents:

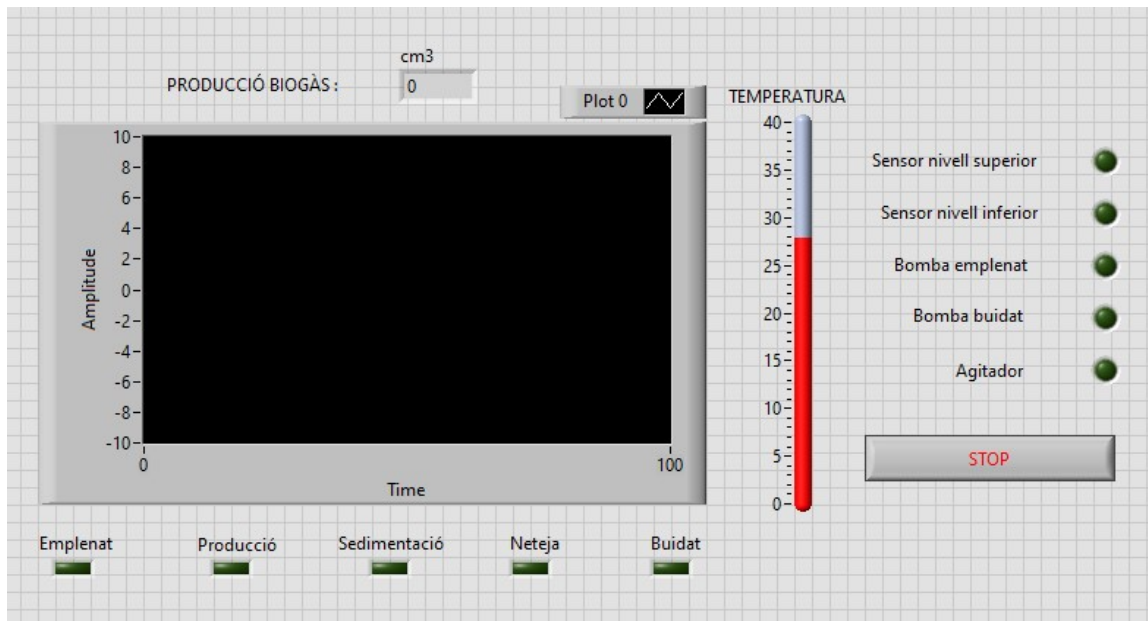


Figura 29. Proposta d'interfície d'usuari per supervisar i controlar el procés de digestió anaeròbia d'un bioreactor experimental.

- Un gràfic que representi l'acumulació de biogàs (*)
- Un quadre on aparegui la quantitat de biogàs acumulat (*)
- Un termòmetre que ens indiqui la temperatura a la que opera el bioreactor.
- Indicadors lumínics per a:
 - La fase del tractament en la que es troba el digester.
 - Sensors i actuadors que estiguin activats.
- Polsador d'aturada del sistema.

(*) en el cas de comptar amb un gasòmetre com el que descriurem al següent apartat.

4.2.5 Disseny d'un gasòmetre amb Arduino

Amb l'objectiu de mesurar la producció de biogàs d'aquest bioreactor experimental, s'utilitza un gasòmetre basat en un tub de Mariotte al qual s'hi ha afegit l'electrònica necessària per enregistrar la producció, i també per comunicar-se amb el PLC. El seu funcionament és el següent:

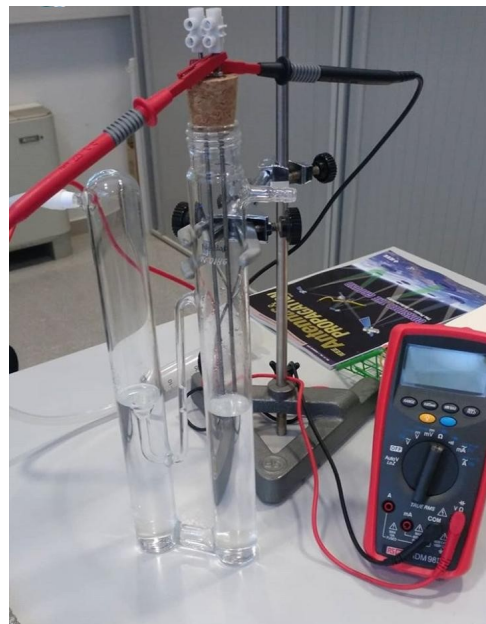


Figura 30. Tub de Mariotte amb elèctrodes i multímetre per mesurar la tensió.

El tub de Mariotte va instal·lat a continuació del digestor experimental i es connecta a aquest mitjançant una canalització per tal de desviar el biogàs produït i poder mesurar-lo. La geometria d'aquest tub (figura 31) permet que, amb l'entrada d'un volum conegut de biogàs, es desplaci una quantitat fixa d'aigua cap a la segona part del tub, pujant així el seu nivell. Al muntatge de la fotografia es poden observar dos elèctrodes. Aquest anirien connectats a una entrada digital de l'Arduino per tal de detectar un canvi de tensió cada vegada que el nivell d'aigua puja i tanca el circuit entre els dos elèctrodes. A banda d'enregistrar la producció en una targeta SD, el gasòmetre genera un senyal en forma de pols cada cop que es detecta aigua als elèctrodes. El PLC ha de ser capaç de llegir aquest senyal.

5. Resultats i discussió

Degut a la adaptació d'aquest treball de fi de grau a les restriccions per COVID-19 ha impossibilitat la implementació pràctica del mateix. D'aquesta manera, l'apartat de resultats perd el seu caràcter experimental i a continuació es fa un llistat dels resultats teòrics obtinguts:

- Mitjançant l'estudi exhaustiu de la digestió anaeròbia, s'ha determinat amb detall quins són els paràmetres ambientals i operacionals dels quals depèn el bon funcionament del procés, i d'aquests quins es poden mesurar mitjançant sensors i quins requereixen tècniques i aparells de laboratori.
- Amb l'anàlisi de les diferents configuracions de bioreactors s'han identificat les configuracions més usuals en bioreactors experimentals i les seves particularitats, acotant així les possibilitats d'automatització.
- Amb l'exploració dels sistemes tecnològics de supervisió i control de processos s'ha aconseguit identificar les funcions dels elements que son indispensables, a més de notar la immensa versatilitat per a realitzar configuracions de tota mena amb tal d'adaptar el màxim el sistema a l'entorn d'un procés.
- A través de la cerca de components del sistema d'automatització que s'ha plantejat, s'ha adquirit cert criteri per a realitzar eleccions rigoroses dins un mercat electrònic tan ampli, tècnic i que evoluciona tan ràpid.

- L'esquema de connexions ha permès endreçar en el seu conjunt i donar forma a una combinació d'elements que no només pretenien adaptar-se als requeriments del digestor en qüestió sinó que havien de ser compatibles entre ells a nivell elèctric.
- A nivell de software i hardware s'han pogut valorar opcions assequibles per a operadors amb una formació no molt extensa en entorns de programació però amb capacitat per ampliar el sistema si es detecten noves necessitats.

La finalitat de l'elecció dels anteriors materials i mètodes era la de millorar alguns aspectes del bioreactor inicial, incorporar noves funcions i ampliar el rang de versatilitat d'aquest. La principal modificacions que s'ha fet respecte al sistema de supervisió i control implantat a l'IRTA ha sigut substituir una placa Arduino per un Controlador Logic Programable industrial pels següents motius:

- La seva electrònica el fa més robust davant de interferències externes que Arduino no pot neutralitzar.
- El fet de que les entrades i sortides es puguin desconnectar i estiguin aïllades redueix interferències internes.
- No es perd el software basat en programari lliure que ens permet fer modificacions de programa sense cost extra del proveïdor.
- Aporta versatilitat de configuració ja que pot ser fàcilment ampliable amb mòduls i una gran quantitat de sensors sense patir interferències.
- Es pot programar com a mestre o com a esclau si tenim altres hardwares connectats i derivar funcions.
- Les entrades poden esdevenir sortides i viceversa si es configuren.
- Encaixa amb el carril DIN.

Una altra modificació respecte al digestor inicial ha estat substituir sensors de nivell de tipus boia per sensors de nivells capacitius. Aquest tipus de sensor de nivell no necessita estar en contacte amb el líquid perquè mesura la seva presència des de fora del digestor. Això el fa especialment interessant per temes d'higiene i manteniment, ja que el sensor es podria malmetre al entrar en contacte amb substàncies corrosives. A més, d'aquesta manera no cal passar cablejat fins a l'interior del digestor. També és interessant perquè es pot regular la seva sensibilitat.

6. Conclusions

En definitiva, les conclusions que s'han extret d'aquest treball d'investigació són les següents:

- Malgrat que la digestió anaeròbia de residus orgànics està basada en un complex equilibri de reaccions metabòliques simultànies, pot ser eficaçment automatitzada mitjançant el control d'alguns paràmetres ambientals i operacionals que intervenen.
- No tots els paràmetres es poden mesurar de manera automàtica: els que estan directament relacionats amb la composició del residu a tractar (nutrients, càrrega orgànica, demanda química d'oxigen,...) continuen requerint complexos tècniques de laboratori o maquinària sofisticada.
- El disseny d'automatització proposat es pot adaptar fàcilment a altres tipus de bioreactors experimentals ja que depenen majoritàriament dels mateixos paràmetres i es controlen mitjançant els mateixos elements.
- En dissenys futurs es poden aprofitar altres prestacions de la PLC com la creació d'històrics, l'enviament d'informació directe a un terminal portàtil mitjançant xarxa wi-fi o la creació d'alarmes en cas de falla del procés.
- L'automatització dels bioreactors pot ser tan senzilla o tan complexa com es desitgi i està totalment oberta a la creativitat i el pressupost ja que la tecnologia de mercat ofereix més prestacions de les que es poden aprofitar.
- La utilització d'una PLC industrial en comptes d'un Arduino com a RTU del sistema amb tota probabilitat conferirà estabilitat i precisió de mesura al sistema.
- Els sensors de nivell capacitius amb tota probabilitat disminuiran falles electròniques provocades pels ambients humits i disminuirà les necessitats de manteniment.

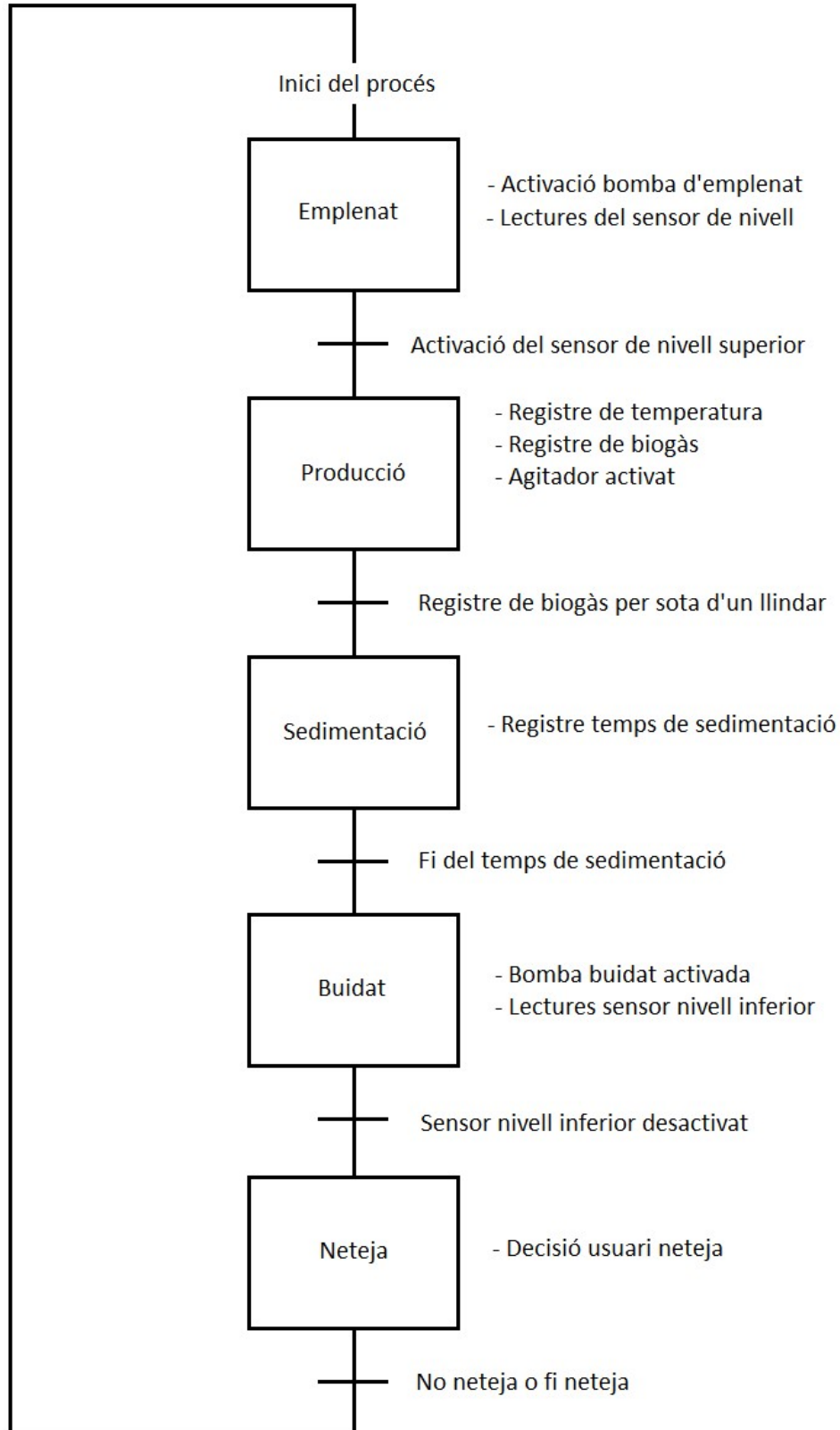
7. Annexos

Annex 1. Softwares de mercat per a sistemes SCADA

Producte	Proveïdor	Característiques rellevants
Factory Link 7	USDATA (http://www.usdata.com/)	Sistema obert.
Paradym-31	Advantech (http://www.advantech.com/)	Compatible amb Windows. Programes de control en temps real.
Virgo 2000	AlterSys Inc.	Modular, robust i flexible. Pot generar diversos controladors virtuals. Es beneficia dels avantatges de diferents sistemes operatius. Funcions lliures de falles.
WizFactory	eMation (http://www.emation.com/)	Solució completa per a informació i automatització.
Cimplicity	GE Fanuc (http://www.gefanuc.com/)	Fiabilitat a temps real. Tecnologia punta. programació orientada a objectes. Bona connectivitat amb bases de dades reconegudes.
Genesis32	Iconics (http://www.iconics.com/)	Rendiment òptim. Bona connectivitat amb bases de dades reconegudes.
Intellution Dynamics	Intellution (http://www.intellution.com/)	Programari d'alt acompliment. Una de les solucions més poderoses disponibles a nivell industrial. Disposa de l'aplicació IBatch, molt emprada en sistemes biològics.
LabView	National Instruments (http://www.ni.com/)	Desenvolupament gràfic amb una metodologia molt fàcil de dominar per enginyers i científics. Programació mitjançant diagrames de bloc. Programació gràfica d'alta velocitat.
Lookout 4.5	National Instruments (http://www.ni.com/)	Programació orientada a objectes. Integració amb funcions d'internet.
HMI/*SCADA Paragon	Nematron (www.nematron.com/)	Fàcil programació i localització d'errors. Programació per diagrames de flux. Fàcil manteniment.
FactoryFloor Programari	Opto 22 (http://www.opto22.com/)	Combina control analògic, control digital, comunicacions serials i de xarxa.

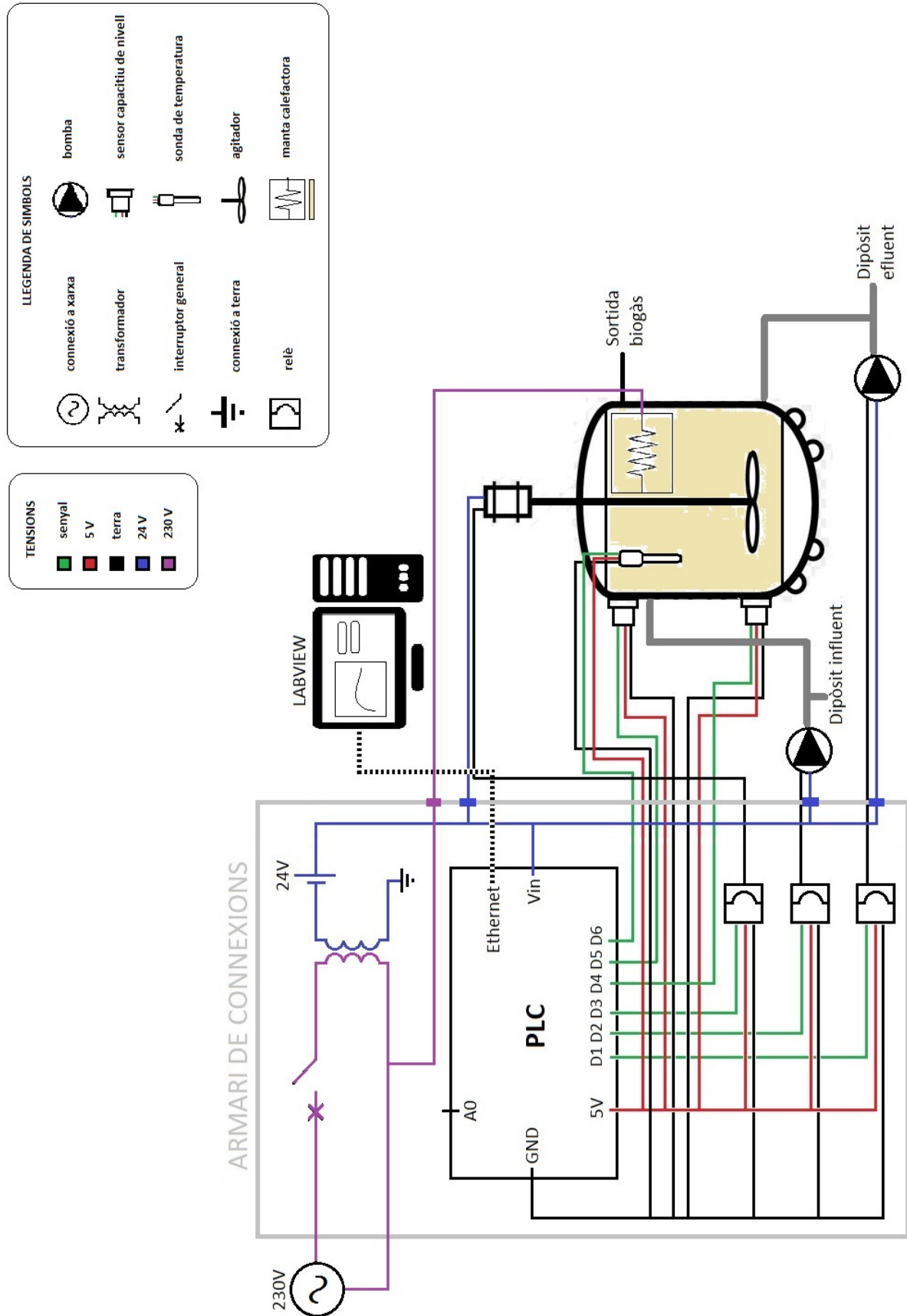
		Bona connexió entre els sistemes de dades i de control.
RSView32	Rockwell Automation (http://www.software.rockwell.com/)	Opera en MS Windows 2000 amb suport per a diferents idiomes. Alt grau de personalització.
RSBatch	Rockwell Automation (http://www.software.rockwell.com/)	Treballa amb seqüències. Arquitectura oberta.
WinCC HMI Veure. 5.0	Siemens	Combina característiques estàndard (gràfics, alarmes, etc) amb altres avançades (reportis, referències entre projectes, diagnòstic de procés, etc).
Web Control Center (webCC)	Siemens	Una sola interfície per a diferents àrees d'una planta industrial.
SIMATIC WinAC	Siemens	Emula el funcionament d'un PLC en un PC. Modificacions amb aplicacions estandard com Excel, Basic, etc.
Aimax	Engineering Products (www.ta-eng.com/home.htm)	Robust i potent. Es poden connectar una àmplia gamma de PLCs, controladors i dispositius d'entrada/sortida. Gran llibreria per a gràfics dinàmics. Bona compatibilitat. Base de dades pròpia.
FactorySuite 2000	Wonderware (http://www.wonderware.com/)	Compta amb l'aplicació InBatch per a processos seqüencials (entre moltes altres). No cal escriure en codi informàtic, es fan servir models. També compta amb base de dades.
SuiteVoyager 1.0	Wonderware (http://www.wonderware.com/)	Connexió senzilla a internet.

Annex 2. Diagrama Grafcet del procés



Annex 3. Esquema de muntatge del sistema

ESQUEMA DE CONNEXIONS



Annex 4. Codi informàtic PLC

```
//declaració de variables:

//entrades
const int sensornivellSUP = 10;
const int sensornivellINF = 9;
const int cabalimetre = 8;
const int temperatura = 7;
const int rellotge = 6;

//sortides
const int bombaemplenat = 5;
const int bombabuidat = 4;
const int agitador = 3;

int value = 0;

//inicialització
void setup() {

    Serial.begin(9600);

    pinMode(sensornivellINF, INPUT); //definició pins entrada
    pinMode(sensornivellSUP, INPUT);
    pinMode(cabalimetre, INPUT);
    pinMode(temperatura, INPUT);
    pinMode(rellotge, INPUT);

    pinMode(bombaemplenat, OUTPUT); //definició pins sortida
    pinMode(bombabuidat, OUTPUT);
    pinMode(agitador, OUTPUT);

}

void loop(){

    digitalRead(temperatura), HIGH;
    digitalRead(rellotge), HIGH;

    //EMPLENAT

    if (digitalRead(sensornivellSUP), LOW) {
        digitalWrite(bombaemplenat, HIGH);
        digitalRead(temperatura);
    } else {
        //PRODUCCIÓ
        digitalWrite(bombaemplenat, LOW); {
            digitalWrite(agitador, HIGH);
        }
        digitalWrite(sensornivellSUP, HIGH);
        digitalRead(cabalimetre);

    //SEDIMENTACIÓ

    if (digitalRead(cabalimetre), LOW) {
        digitalWrite(agitador,LOW);
        Serial.println("Producció finalitzada");
    }

}

//NETEJA

if (digitalRead(rellotge), LOW) and (digitalRead(sensornivellINF), HIGH) {
    digitalWrite(bombabuidat, HIGH);
} else {
    digitalWrite(bombabuidat, LOW);
}

delay(1000);
}
```

8. Referències

Recursos bibliogràfics

ACOSTA, Yaniris Lorenzo; ABREU, Ma Cristina Obaya. *La digestión anaerobia. Aspectos teóricos*. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 2005, vol. 39, no 1, p. 35-48.

ARIAS VALLADOLID, Juan Andrés, et al. *Diseño, construcción y validación de un biorreactor a escala de laboratorio con sistema de control automático*. 2018. Bachelor's Thesis. Espol.

BJÖRNSSON, Lovisa, et al. *Evaluation of new methods for the monitoring of alkalinity, dissolved hydrogen and the microbial community in anaerobic digestion*. Water Research, 2001, vol. 35, no 12, p. 2833-2840.

CIVIT ABELLA, Marta. *Inhibició del procés de digestió anaeròbia per nitrogen amoniacal*. 2014. Master's Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya.

FLOTATS RIPOLL, Xavier, et al. *Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria*. Porci, 2001, no 65, p. 51-65.

FLOTATS RIPOLL, Xavier, et al. *Producció de biogàs per codigestió anaeròbia*. Col·lecció Quadern Pràctic, volum 1. Institut Català d'Energia. Generalitat de Catalunya.

GUIMARÃES, Claudinei De Souza; MAIA, David Rodrigues da Silva; SERRA, Eduardo Gonçalves. *Construction of biodigesters to optimize the production of biogas from anaerobic co-digestion of food waste and sewage*. Energies, 2018, 11.4: 870.

IDAE, 2007. *Biomasa: Digestores anaerobios*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Consultat el 26/7/2020. <http://www.idae.es>

ISAT, 2011. Biogas Digest. Biogas Basics. *Information and Advisory Service on Appropriate Technology*. Consultat el 2/8/2020. <http://www.biores.eu/docs/BIOGASFUNDAMENTALS/biogasdigestvol1.pdf>

JANTSCH, Tor Gunnar; MATTIASSON, Bo. *An automated spectrophotometric system for monitoring buffer capacity in anaerobic digestion processes*. Water Research, 2004, vol. 38, no 17, p. 3645-3650.

JUVERT VILA, Eva. *Disseny d'una planta de tractament de purins amb producció de biogàs*. Treball final de carrera. Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa, 2004.

MADSEN, Michael; HOLM-NIELSEN, Jens Bo; ESBENSEN, Kim H. *Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective*. Renewable and sustainable energy reviews, 2011, vol. 15, no 6, p. 3141-3155.

MÍNGUEZ MARTÍNEZ, Josep Vicent. *Disseny d'un digester per a l'obtenció de biogàs a partir de fangs de depuradora generats en una indústria alimentària*. 2015. Tesis Doctoral.

MOLINA, Francisco, et al. *Pilot-scale validation of a new sensor for on-line analysis of volatile fatty acids and alkalinity in anaerobic wastewater treatment plants*. Environmental engineering science, 2009, vol. 26, no 3, p. 641-649.

MUQEET, Mohd Abdul, et al. *PLC and SCADA Based Control of Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)*. *IJIREECE*, vol. 3, no 12.

REDC, Red Española De Compostaje. *Ingeniería y aspectos técnicos de la digestión anaeróbica II. 4*. Mundi-Prensa Libros, 2016.

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). *Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources*. *Bioresource technology*, 99(17), 7928-7940.

YU, Dawei, et al. *Biogas-pH automation control strategy for optimizing organic loading rate of anaerobic membrane bioreactor treating high COD wastewater*. *Bioresource technology*, 2016, 203: 62-70.

Pàgines web

AULA21 (2020, 16 abril). *Qué es un sistema SCADA, para qué sirve y cómo funciona* [en línia]. Formación para la Industria. [Consulta: 5 juliol 2020]. Disponible a: <https://www.cursosaula21.com/ques-un-sistema-scada/>

AULA21 (2020, 9 junio). *Qué es un Autómata Programable o PLC y cómo funciona* [en línia]. Formación para la Industria. [Consulta: 12 juliol 2020]. Disponible a: <https://www.cursosaula21.com/ques-un-automata-programable-o-plc-y-como-funciona/>

AUTOMATAS (2006, 2 marzo). *automatas.org* [en línia]. [Consulta: 5 juliol 2020]. Disponible a: <https://www.automatas.org/redes/scadas.htm>

CIC Coinsulting informático. (2019, 20 febrero). *SCADA y la Industria 4.0* [en línia]. Cic.es. [Consulta: 6 juliol 2020]. Disponible a: <https://www.cic.es/scada-y-la-industria-4-0/>

CONNECTROL S.A. (s. f.). *Bomba Sumergible Agua 12 V DC 4 L /min*. Electrónica y informática [en línia]. [Consulta: 12 agost 2020]. Disponible a: <https://www.conectrolinformatica.com/bombas-electricas/4152-bomba-sumergible-agua-12v-dc-4l-min.html>

CRN TECNOPART, S.A. (2020). *Mantas calefactores serie HM* [en línia]. Calefactores flexibles. [Consulta: 22 agost 2020]. Disponible a: <http://www.crntecnopart.com/index.php/es/productos/calefactores-flexibles>

DF ROBOT. (s. f.). *Analog_ORP_Meter_SKU_SEN0165_-DFRobot* [en línia]. Drive the future. [Consulta: 30 agost 2020]. Disponible a: https://wiki.dfrobot.com/Analog_ORP_Meter_SKU_SEN0165_

INDUSTRIAL SHIELDS. (s. f.). *PLC Arduino ARDBOX 20 I/Os Analog HF Modbus* [en línia]. Boot & Work Corp. S.L. [Consulta: 15 agost 2020]. Disponible a: https://www.industrialshields.com/es_ES/shop/product/plc-arduino-ardbox-20-i-os-analog-hf-modbus-17

- LLAMAS, Luis. (2016, 27 junio). *Medir temperatura de líquidos y gases con Arduino y DS18B20* [en línea]. Ingeniería, informática y diseño. [Consulta: 2 agosto 2020]. Disponible a: <https://www.luisllamas.es/temperatura-liquididos-arduino-ds18b20/>
- LLAMAS, Luis. (2016b, diciembre 13). *Medir caudal y consumo de agua con Arduino y caudalímetro* [en línea]. Ingeniería, informática y diseño. [Consulta: 4 agosto 2020]. Disponible a: <https://www.luisllamas.es/caudal-consumo-de-agua-con-arduino-y-caudalimetro/>
- LLAMAS, Luis. (2016b, julio 18). *Controlar grandes cargas con Arduino y transistor MOSFET* [en línea]. Ingeniería, informática y diseño. [Consulta: 4 agosto 2020]. Disponible a: <https://www.luisllamas.es/arduino-transistor-mosfet/>
- LLAMAS, Luis. (2016d, diciembre 18). *Encender una bomba de agua con Arduino* [en línea]. Ingeniería, informática y diseño. [Consulta: 6 agosto 2020]. Disponible a: <https://www.luisllamas.es/bomba-de-agua-con-arduino/>
- LLAMAS, Luis. (2016c, julio 23). *Manejar cargas de más de 220V con Arduino y salida por relé* [en línea]. Ingeniería, informática y diseño. [Consulta: 7 agosto 2020]. Disponible a: <https://www.luisllamas.es/arduino-salida-rele/>
- NAYLAMP Mechatronics. (s. f.). *Sensor de nivel capacitivo sin contacto XKC-Y25-T12V* [en línea]. Naylamp Mechatronics - Perú. [Consulta: 12 agosto 2020]. Disponible a: <https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/435-sensor-de-nivel-capacitivo-sin-contacto-xkc-y25-t12v.html>
- ORDOÑEZ, G. (2009, octubre). *Unidades remotas SCADA* [en línea]. The Wireless Data. [Consulta: 29 julio 2020]. Disponible a: https://www.oocities.org/gabrielordonez_ve/Unidades_Remotas_SCADA.htm
- RS COMPONENTS. (s. f.). *HDR-15-24 | Fuente de alimentación de montaje en carril DIN Mean Well, HDR, 1 salida 24 V dc 630 mA 15.2 W* [en línea]. RS Components - rs-online. [Consulta: 31 agosto 2020]. Disponible a: <https://es.rs-online.com/web/p/fuentes-de-alimentacion-de-montaje-en-carril-din/>
- SELEKTRON Microcontrol S.L. (2015). *Módulo de 8relés en carril DIN, con fusibles. RLY08062F* [en línea]. Monitorización y control. RS Components. [Consulta: 12 agosto 2020]. Disponible a: <http://selektron.com/rly08062f.htm>
- WIKIPEDIA. (2020a, febrero 9). *Carril DIN* [en línea]. Wikipedia, la enciclopedia libre. [Consulta: 12 agosto 2020]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Carril_DIN
- WIKIPEDIA. (2020, 18 septiembre). *Interruptor diferencial* [en línea]. Wikipedia, la enciclopedia libre. [Consulta: 13 agosto 2020]. Disponible a: [https://es.wikipedia.org/wiki/Interruptor_diferencial#:~:text=Un%20interruptor%20diferencial%20\(ID\)%2C,con%20partes%20activas%20de%20la](https://es.wikipedia.org/wiki/Interruptor_diferencial#:~:text=Un%20interruptor%20diferencial%20(ID)%2C,con%20partes%20activas%20de%20la)