



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

**Impatto della Tecnologia GOLEM sulla Riduzione delle Emissioni di
Metano e i Benefici per la Salute Pubblica**

**Impact of GOLEM Technology on Methane Emissions Reduction and
Public Health Benefits**

Relatrice:

Prof.ssa Laura Burattini

Correlatrice:

Ing. Veronica Crognalotti

Autore:

Andrea Nicola D'Alessandro

Anno Accademico: 2023/2024

Indice

INTRODUZIONE	I
1. MECCANISMI BIOLOGICI COLLEGATI AL CAMBIAMENTO CLIMATICO E ALLE MALATTIE CARDIOVASCOLARI	1
1.1 Effetto emodinamico del cambiamento di temperatura	3
1.2 Stato di idratazione e rischio cardiovascolare	4
1.3 Attivazione del Sistema Simpatico e del Sistema Renina-Angiotensina in risposta alle temperature estreme	4
1.4 Infiammazione e adattamenti Cardiovascolari alle temperature estreme	5
1.5 Impatti dell'inquinamento atmosferico sul Sistema Nervoso Autonomo e le malattie Cardiovascolari	6
1.6 Influenza del particolato sulla funzione vascolare e l'arteriosclerosi	7
1.7 Effetti Diretti degli inquinanti atmosferici sui tessuti cardiovascolari	8
2. IL GAS NATURALE IN ITALIA	9
2.1 Filiera del gas naturale in Italia	9
2.2 Le emissioni di metano	21
2.3 Calcolo delle emissioni	33
3. EFFICACIA DELLA TECNOLOGIA GOLEM NELLA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI DI METANO	36
3.1 Il GOLEM	37
3.2 Risultati ottenuti per la media pressione	56
3.2.1 Calcolo delle emissioni di CH ₄ in MP	57
3.2.2 Calcolo delle emissioni di CH ₄ in MP con l'implementazione del GOLEM	58
3.2.3 Caso pratico: Impianto Casamassima	60
3.3 Risultati ottenuti per la bassa pressione	64
3.3.1 Calcolo delle emissioni di CH ₄ in BP	65
3.3.2 Calcolo delle emissioni di CH ₄ in BP con l'implementazione del GOLEM	66
Conclusioni	V
BIBLIOGRAFIA	XI

Abstract

Il cambiamento climatico rappresenta una delle maggiori minacce per la salute pubblica globale. Il riscaldamento globale, una delle espressioni più evidenti del cambiamento climatico, sta contribuendo ad un incremento delle malattie cardiovascolari e respiratorie, aggravato dalle emissioni di metano, un potente gas serra. In Italia, queste emissioni provengono principalmente dai settori energetico, agricolo e dalla gestione dei rifiuti, oltre che dalle infrastrutture di distribuzione del gas naturale.

Nel primo capitolo sono approfonditi i meccanismi biologici attraverso i quali il cambiamento climatico influisce sulla salute umana, sottolineando come l'aumento delle temperature globali sia strettamente correlato all'incremento dell'insorgenza di problemi cardiovascolari e respiratori, rendendo necessaria ed urgente la messa in opera di interventi efficaci.

Il secondo capitolo analizza le principali fonti di emissioni di metano in Italia, con un'attenzione particolare al settore energetico e alle infrastrutture di distribuzione del gas. Viene, inoltre, fornita una panoramica delle attuali tecnologie e strategie utilizzate per monitorare e ridurre queste emissioni.

Nel terzo capitolo viene approfondita la tecnologia GOLEM, sviluppata da AUTOMA. GOLEM è un innovativo servomeccanismo per il controllo remoto delle valvole di regolazione nelle reti di distribuzione del gas. All'interno del capitolo viene descritto il funzionamento di GOLEM e come questa tecnologia possa ridurre efficacemente le emissioni fuggitive di metano nelle cabine RE.MI e nei GRF, migliorando al contempo l'efficienza operativa.

L'obiettivo principale di questo studio è la valutazione dell'efficacia di GOLEM nella riduzione delle emissioni di metano, al fine di apportare benefici potenziali sulla salute pubblica, derivanti dalla diminuzione dell'inquinamento atmosferico. I risultati dimostrano che l'adozione di tecnologie avanzate come GOLEM, può assumere un ruolo fondamentale nel mitigare i rischi correlati al cambiamento climatico e, al contempo, nel promuovere una maggiore tutela della salute umana. Dunque, riducendo l'incidenza di malattie respiratorie e cardiovascolari, miglioriamo la qualità della vita delle persone e contribuiamo a un futuro più sostenibile.

Introduzione

Il metano (CH_4) è un idrocarburo che oltre ad essere il componente principale del gas naturale è anche il 2° gas serra antropico più abbondante dopo l'anidride carbonica (CO_2) e ha un significativo impatto sulla temperatura terrestre e sul cambiamento climatico.

Il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide più grandi e urgenti del nostro tempo, influenzando non solo gli ecosistemi naturali ma anche la salute umana in modi complessi e significativi. La manifestazione più evidente di questo fenomeno è il riscaldamento globale che comporta un aumento diretto della temperatura media terrestre e un aumento indiretto dei livelli di inquinanti atmosferici - come l'ozono (O_3) e il particolato fine (PM2.5) - due fattori che si combinano per aggravare le condizioni della salute pubblica. Molti studi [1], infatti, hanno evidenziato come il riscaldamento globale influenzi negativamente le malattie cardiovascolari che includono condizioni patologiche come l'ipertensione, il diabete, le malattie ischemiche del cuore, l'insufficienza cardiaca e l'ictus. Queste malattie cardiovascolari rappresentano la principale causa di morte a livello globale, con circa 18 milioni di decessi all'anno e costituendo una significativa preoccupazione per la sanità pubblica.

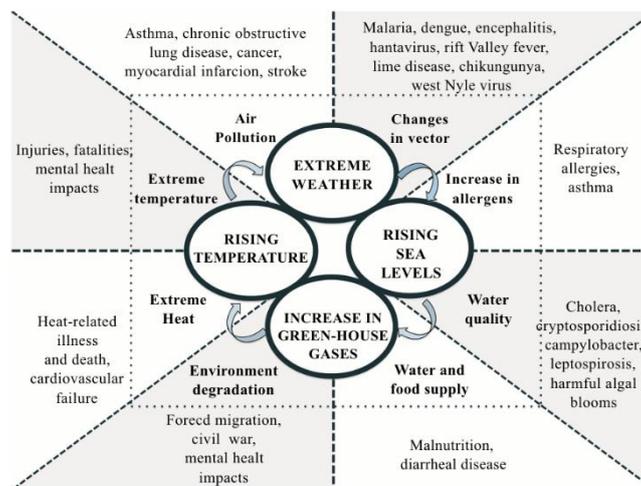


Figura 1: Impatto del cambiamento sulla salute. [1]

L'impatto sanitario degli inquinanti atmosferici legati direttamente e indirettamente alla produzione di energia attraverso l'uso del gas naturale è stato valutato nell'anno 2019 in **2864 morti premature, oltre 15000 casi di impatti respiratori sugli adulti e sui bambini, oltre 4100 ricoveri ospedalieri e più di 5 milioni di giorni lavorativi perduti a causa di malattie** [2]. Anche questo studio mette l'Italia al primo posto tra i paesi con i maggiori costi sanitari, con 2,17 miliardi di Euro (rispetto a un totale di 8,7 miliardi di Euro nell'area oggetto dello studio) dovuti all'uso del gas naturale negli impianti termoelettrici.

L'inquinamento atmosferico consiste nell'introduzione di molecole nocive nell'atmosfera terrestre come gas, composti organici volatili (VOC), ossidi di azoto e particelle primarie carboniose e non carboniose. Tra queste sostanze, gli inquinanti primari vengono emessi direttamente nell'atmosfera attraverso la combustione di combustibili fossili. Altri inquinanti, definiti come secondari, vengono prodotti nell'atmosfera a causa di processi chimici tra le sostanze tossiche primarie e i fattori atmosferici. Il più rilevante di questi inquinanti è l'ozono, la cui concentrazione è prevista in aumento fino al 2040, insieme a un incremento della mortalità e delle morti premature.

Il metano contribuisce anche alla formazione dell'**ozono troposferico**, un altro gas serra a breve durata ma molto inquinante che danneggia la salute umana, la produzione di cibo e gli ecosistemi. L'ozono troposferico influisce sulla salute umana compromettendo le funzioni respiratorie e cardiovascolari, con conseguente aumento dei ricoveri ospedalieri, assenze da scuola e lavoro, uso di farmaci e perfino mortalità prematura. L'esposizione a **breve termine** all'ozono può causare sintomi respiratori, ridotta funzionalità polmonare e infiammazione delle vie aeree. A **lungo termine**, l'ozono può aggravare l'asma e aumentare l'incidenza di ictus. L'unica nota "positiva" che ha questo gas per la salute umana è che blocca le radiazioni UV. [3]

Nell'ambito del Global Methane Assessment, cinque team di ricerca hanno partecipato ad uno studio modellistico integrato degli impatti delle emissioni di metano sulle concentrazioni di ozono troposferico e sul sistema climatico, e dei possibili benefici di una riduzione di queste emissioni. [4] Lo studio ha messo in evidenza **conseguenze particolarmente significative per il nostro Paese** per quanto riguarda i ricoveri in ospedale e le visite nei pronto soccorso dovuti all'esposizione all'ozono, nonché alle perdite totali e relative dei raccolti di mais e soia.

La formazione dell'ozono è strettamente legata alla radiazione solare, rendendolo molto sensibile alla variabilità meteorologica e climatica. Le concentrazioni di ozono seguono un ciclo stagionale, raggiungendo i picchi tra l'inizio della primavera e la fine dell'estate in Europa. L'oscillazione delle concentrazioni di ozono da un anno all'altro dipende in gran parte dalla temperatura e dalla secchezza dell'estate, in quanto intense ondate di calore possono portare a valori di picco elevati. A causa della sua dipendenza dalla luce solare, l'Europa meridionale tende ad avere concentrazioni di ozono più elevate rispetto all'Europa settentrionale. [5]

Le concentrazioni di ozono annuali sono leggermente aumentate in Europa tra il 2005 e il 2019, mentre i picchi di ozono più elevati sono diminuiti [6]. Nel 2020 solo il 19 % delle stazioni di monitoraggio dell'ozono a livello del suolo in Europa ha raggiunto l'obiettivo a lungo termine fissato dalla **direttiva del 2008 sulla qualità dell'aria e dell'ambiente** [7], secondo cui la media massima

giornaliera di otto ore non può superare 120 microgrammi per metro cubo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entro un anno civile [5]. La percentuale della popolazione esposta a concentrazioni superiori al **valore guida a breve termine dell'OMS 2021** (la media massima giornaliera su otto ore di $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ha oscillato tra il 93 % e il 98 % nel periodo 2013-2020, senza alcuna tendenza al ribasso nel tempo.

Secondo l'OMS alti livelli di ozono causano problemi respiratori, innescano l'asma, riducono la funzione polmonare e causano malattie polmonari. Nel 2020 si stima che **24 000 persone** nei 27 Stati membri dell'UE siano morte prematuramente a causa dell'esposizione acuta all'ozono superiore a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. I paesi con i più alti tassi di mortalità nel 2020 a causa dell'esposizione all'ozono sono stati Albania, Montenegro, Grecia, Bosnia-Erzegovina e Macedonia del Nord, in ordine decrescente [8].

La mortalità legata all'esposizione acuta all'ozono dovrebbe aumentare a causa dei cambiamenti climatici entro il 2050, in particolare nell'Europa centrale e meridionale [9]. È stato stimato che i cambiamenti climatici da soli porteranno a un aumento del 15% del numero totale di decessi prematuri acuti legati all'ozono in Europa verso il 2080 nell'ambito dello scenario climatico RCP 4.5. Tra il 2000 e il 2050 le perdite nette in termini di benessere economico (compresi i costi di mortalità e le perdite nel tempo libero) dovute agli impatti sulla salute legati all'ozono derivanti dai cambiamenti climatici e dalle emissioni dei precursori potrebbero ammontare a 9,1 miliardi di euro. L'effetto sui costi delle variazioni previste delle emissioni supererebbe ampiamente l'impatto climatico [10].

Secondo la **direttiva del 2008 sulla qualità dell'aria ambiente** [7], gli Stati membri devono monitorare e comunicare i dati sull'ozono troposferico all'Agenzia europea dell'ambiente (EEA). Le concentrazioni di ozono vengono monitorate in quasi 2000 stazioni in tutta Europa, comprese stazioni di fondo rurali, suburbane e urbane, per documentare l'esposizione della popolazione. L'ozono viene misurato anche nelle stazioni industriali e di traffico, situate nelle immediate vicinanze di una strada principale o di una zona industriale / fonte.

La direttiva stabilisce un **valore-obiettivo** e un **valore-obiettivo a lungo termine** per l'ozono al fine di proteggere la salute umana. Una panoramica delle norme giuridiche per l'ozono troposferico stabilite nella direttiva per proteggere la salute umana e ambientale è riportata nella Tabella 1.

Tabella 1: Panoramica dei valori soglia e obiettivo e degli obiettivi a lungo termine per l'ozono troposferico in atmosfera.[3]

Valore-obiettivo per la protezione della salute umana	Valore Target per la protezione della vegetazione	Obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana	Obiettivo a lungo termine per la protezione della vegetazione	Soglia di informazione per la protezione della salute umana	Soglia di allerta per la protezione della salute umana
media massima giornaliera di 8 ore: 120 µg/m ³ per più di 25 giorni per anno civile in media su tre anni	AOT40* da maggio a luglio: 18 000 µg/m ³ x h in media su cinque anni	media massima giornaliera su 8 ore nell'arco di un anno civile: 120 µg/m ³	AOT40* da maggio a luglio: 6 000 µg/m ³ x h	Concentrazione di 1 ora: 180 µg/m ³	Concentrazione di 1 ora: 240 µg/m ³

* AOT40 (µg/m³ x ore) è la somma della differenza tra concentrazioni orarie superiori a 80 µg/m³ e 80 µg/m³ in un determinato periodo utilizzando solo i valori di 1 ora misurati tra le 8.00 e le 20.00 ore dell'Europa centrale (CET) ogni giorno

Inoltre la direttiva prevede anche **l'obbligo normativo di informare la popolazione** in merito alle alte concentrazioni di ozono troposferico:

- La **soglia di informazione** riflette un "livello oltre il quale vi è un rischio per la salute umana derivante da una breve esposizione per parti particolarmente sensibili della popolazione". In caso di superamento della soglia, le autorità nazionali sono tenute a informare il pubblico.
- La **soglia di allerta** riflette un "livello oltre il quale vi è un rischio per la salute umana derivante da una breve esposizione per la popolazione in generale". Le autorità nazionali sono tenute a informare il pubblico, fornire consulenza e attuare piani d'azione a breve termine in caso di superamento di tale soglia.

Il superamento di entrambe le soglie dovrebbe essere comunicato dagli *Stati membri alla Commissione europea*.

Questo studio ha l'obiettivo di comprendere e riportare l'effetto del cambiamento climatico sulla salute umana e quantificare le emissioni di metano derivanti dalle linee di distribuzione in media e bassa pressione in Italia, valutando l'efficacia della tecnologia GOLEM proposta da AUTOMA nel ridurre queste emissioni, migliorando la qualità dell'aria e riducendo i rischi per la salute associati alle emissioni di metano. La speranza è che i risultati di questa ricerca possano contribuire a sensibilizzare ulteriormente sull'importanza di affrontare il cambiamento climatico e ridurre l'inquinamento atmosferico, non solo per il benessere dell'ecosistema, ma anche per la salute e la qualità della vita delle persone.

1. Meccanismi biologici collegati al cambiamento climatico e alle malattie cardiovascolari

Il cambiamento climatico, con le sue implicazioni su temperature estreme e inquinamento atmosferico, ha dimostrato di avere un impatto significativo sulla salute umana, in particolare sulle malattie cardiovascolari. Le evidenze epidemiologiche indicano che le variazioni di temperatura e l'aumento degli inquinanti atmosferici sono strettamente correlati a un aumento della mortalità e della morbosità cardiovascolare.

Numerosi studi hanno dimostrato una relazione a forma di U (U-shape) tra temperatura e mortalità cardiovascolare. In ambienti con temperature miti la mortalità è generalmente bassa, ma aumenta progressivamente sia a temperature molto basse che molto alte. Le regioni con climi freddi vedono un impatto maggiore delle temperature calde, mentre le regioni con climi caldi vedono un impatto maggiore delle temperature basse. Questo suggerisce che il corpo umano si acclimi ad una certa gamma di temperature e faticchi ad adattarsi a condizioni termiche estreme non usuali, soprattutto per brevi periodi di tempo.

Gli eventi di freddo estremo sono stati associati a un aumento della mortalità cardiovascolare. Studi europei hanno mostrato che le ondate di freddo sono correlate a un aumento del 25% delle morti, con un incremento significativo delle malattie cardiache. In Cina, le temperature estremamente basse sono state associate ad un aumento della mortalità cardiovascolare tra il 40% e il 65% durante i periodi di freddo rispetto ai periodi adiacenti degli anni.

Le temperature elevate sono altrettanto pericolose. Studi condotti negli Stati Uniti e in Europa hanno evidenziato un aumento della mortalità per malattie cardiovascolari durante i giorni di caldo estremo. Ad esempio, uno studio su 99 città statunitensi ha riscontrato che le ondate di calore erano associate a un aumento del rischio di morte cardiovascolare di circa il 2%. In Cina, le temperature elevate sono state correlate a un aumento della mortalità per malattie ischemiche del cuore, con un rischio maggiore per gli anziani e le donne.

Oltre alla mortalità, le temperature estreme influenzano significativamente la morbosità cardiovascolare, aumentando i ricoveri ospedalieri e le visite al pronto soccorso per eventi acuti come infarti miocardici, ictus e sindromi aortiche acute. Una revisione epidemiologica su larga scala ha confermato la relazione a U tra morbosità e temperatura, indicando che gli effetti più significativi si osservano alle temperature estreme. Anche la variabilità diurna della temperatura, con ampie

escursioni termiche giornaliere, è associata ad un aumento della mortalità e morbosità cardiovascolare in diverse regioni e popolazioni.

L'inquinamento atmosferico, un altro effetto significativo del cambiamento climatico, ha dimostrato di avere un impatto sostanziale sulla salute cardiovascolare. L'ozono, un potente ossidante, e il particolato (PM), in particolare PM2.5, sono i principali inquinanti associati a malattie cardiovascolari. L'aumento delle emissioni di ozono è correlato al cambiamento climatico e l'esposizione a breve termine a questo gas è stata collegata a un aumento della mortalità e morbosità per malattie respiratorie e cardiovascolari. L'ozono può provocare aritmie cardiache, con un incremento del rischio di fibrillazione atriale e altre aritmie ventricolari.

L'esposizione al particolato è associata a un aumento del rischio di malattie cardiopolmonari, con studi che dimostrano che un aumento delle concentrazioni di PM2.5 è correlato a un incremento significativo del rischio di mortalità cardiovascolare e di eventi acuti come infarti e ictus. Il particolato provoca disfunzioni endoteliali e infiammazioni vascolari, contribuendo alla patogenesi delle malattie cardiovascolari attraverso l'attivazione di meccanismi pro-trombotici e l'ossidazione lipidica.

Queste evidenze epidemiologiche mettono in luce l'urgenza di monitorare attentamente gli effetti combinati del cambiamento climatico e dell'inquinamento atmosferico sulla salute cardiovascolare. È essenziale sviluppare strategie di mitigazione per ridurre l'impatto di questi fattori sulla salute pubblica. Questo capitolo proseguirà esplorando i meccanismi biologici che collegano il cambiamento climatico alle malattie cardiovascolari, fornendo una comprensione più approfondita di come questi fattori interagiscono e influenzano la salute umana. [1]

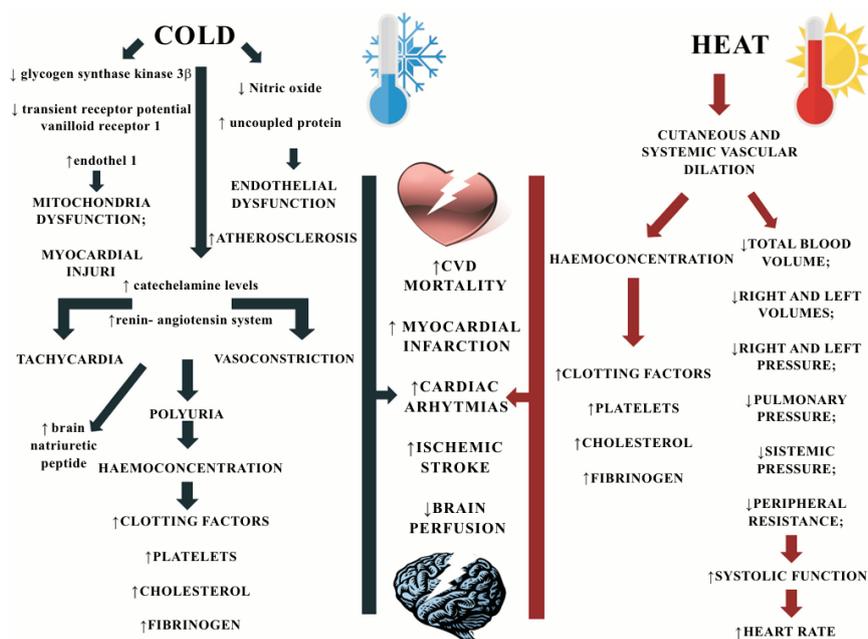


Figura 2: Meccanismi attraverso i quali le temperature estreme possono aumentare le malattie cardiovascolari. [1]

1.1 Effetto emodinamico del cambiamento di temperatura

I meccanismi di adattamento alle temperature estreme comportano cambiamenti fisiologici complessi che, sebbene necessari per la sopravvivenza, possono aumentare significativamente il rischio di malattie cardiovascolari e altri problemi di salute.

Quando il corpo è esposto a temperature fredde, i recettori cutanei del freddo vengono stimolati, portando a un aumento dei livelli di catecolamine. Questo provoca vasocostrizione, tachicardia e aumento della pressione sanguigna. Questi cambiamenti possono causare ischemia miocardica, specialmente nei pazienti con placche coronariche. Il freddo induce anche poliuria, che porta a un aumento della viscosità del sangue e delle concentrazioni di fattori della coagulazione, piastrine, colesterolo, fibrinogeno e numero di eritrociti. Questi cambiamenti aumentano il rischio di eventi cardiovascolari come infarti e ictus.

Durante l'esposizione al calore, il corpo risponde con una vasodilatazione generale per aumentare la conduttanza vascolare sia nel sistema cutaneo che in quello sistemico, riducendo l'aumento della temperatura corporea centrale. Tuttavia, questo impone una richiesta acuta sul sistema cardiovascolare. Il riscaldamento del corpo intero aumenta la frequenza cardiaca e riduce il volume sanguigno centrale, influenzando la pressione e i volumi atriali, la pressione del sistema polmonare e sistemico, e la resistenza periferica totale. La diminuzione del volume totale di sangue nel torace e nell'addome può causare un aumento della funzione sistolica, ma la gittata cardiaca migliora principalmente attraverso un aumento della frequenza cardiaca, causando problemi per i pazienti con insufficienza cardiaca.

Il calore induce anche un aumento del numero di cellule del sangue, aumentando la viscosità del sangue. Inoltre, promuove la produzione di proteine da shock termico (Hsp), che proteggono le proteine cellulari e svolgono un ruolo anti-apoptotico, contribuendo a prevenire l'ischemia miocardica. Tuttavia, lo stress da calore può ancora provocare effetti negativi significativi sul sistema cardiovascolare, specialmente nei soggetti vulnerabili. [1]

1.2 Stato di idratazione e rischio cardiovascolare

Come conseguenza diretta di queste considerazioni emodinamiche, le variazioni di temperatura possono influenzare direttamente lo stato di idratazione, stressando ulteriormente il sistema cardiovascolare. Alcuni studi hanno esaminato queste teorie valutando marcatori indiretti dello stato di idratazione, tra cui il rapporto azoto ureico-creatinina, la gravità specifica delle urine, la tonicità plasmatica e l'ematocrito sanguigno. In termini di ricoveri ospedalieri, uno studio coreano ha dimostrato un aumento delle visite di emergenza globalmente associato ai parametri di idratazione. I risultati di questo studio suggeriscono che eventi cerebrovascolari, sia ischemici che emorragici, siano associati al livello di idratazione, suggerendo un ruolo dell'emoconcentrazione e dell'iperviscosità. Anche i cambiamenti nell'equilibrio elettrolitico e acido-base possono essere considerati come fattori scatenanti per eventi cardiovascolari acuti. [1]

1.3 Attivazione del Sistema Simpatico e del Sistema Renina-Angiotensina in risposta alle temperature estreme

L'attivazione del sistema nervoso simpatico e del sistema renina-angiotensina¹ svolge un ruolo cruciale nell'aumento della pressione sanguigna e nell'insorgenza di malattie cardiovascolari, come l'infarto miocardico. Studi hanno dimostrato che l'attività nervosa simpatica muscolare aumenta significativamente in individui sani esposti a temperature estremamente fredde, risultando in un incremento delle pressioni sanguigne sistolica e diastolica. Questo effetto è particolarmente pronunciato nei soggetti obesi, che mostrano una risposta simpatica più elevata allo stress da freddo.

Esperimenti hanno inoltre evidenziato cambiamenti significativi nel sistema simpatico durante la transizione sonno-veglia e i cambiamenti ortostatica-clinostatica in condizioni di freddo. Questi risultati possono spiegare l'aumento degli eventi cardiovascolari che si verificano frequentemente nelle mattine invernali. La variabilità della frequenza cardiaca, misurata in vari studi, ha rivelato che l'aumento della temperatura ambientale è inversamente correlato a diversi parametri di variabilità della frequenza cardiaca. Questo suggerisce un'attivazione del tono simpatico e una riduzione dell'attività vagale in risposta al caldo. Tuttavia, alcune ricerche indicano che i cambiamenti simpatici

¹ Il sistema renina-angiotensina (RAS) è un sistema ormonale che svolge un ruolo cruciale nella regolazione della pressione arteriosa.

sono maggiormente associati a temperature basse, specialmente durante il sonno, suggerendo che le differenze climatiche e individuali possano influenzare questi risultati.

Inoltre, è stato osservato che i livelli di angiotensina-II aumentano durante l'esposizione all'aria fredda in pazienti con eventi cardiovascolari maggiori, indicando un'attivazione del sistema renina-angiotensina. Questa attivazione contribuisce all'aumento della pressione sanguigna, fornendo un chiaro meccanismo biologico che collega le variazioni di temperatura alle malattie cardiovascolari. Questi meccanismi sottolineano l'importanza di comprendere come le temperature estreme influenzino la fisiologia umana e aumentino il rischio di malattie cardiovascolari, per sviluppare strategie di prevenzione efficaci e migliorare la salute pubblica. [1]

1.4 Infiammazione e adattamenti Cardiovascolari alle temperature estreme

L'esposizione prolungata a temperature fredde ha dimostrato di promuovere non solo la crescita delle placche aterosclerotiche, ma anche di aumentare la loro instabilità e il rischio di rottura. Le basse temperature modificano il profilo lipidico plasmatico, aumentando i livelli di LDL (lipoproteine a bassa densità), e inibiscono l'enzima endoteliale eNOS, contribuendo alla disfunzione endoteliale e allo sviluppo dell'aterosclerosi. In particolare, la riduzione dell'adiponectina, un importante regolatore dell'attività di eNOS, è stata associata a un maggiore rischio di aterosclerosi indotta dal freddo.

Studi su roditori hanno dimostrato che l'esposizione al freddo sopprime l'adiponectina e aumenta l'espressione della Proteina Disaccoppiatrice (UCP), che gioca un ruolo nella termogenesi del tessuto adiposo bruno, contribuendo alla formazione e all'instabilità delle placche aterosclerotiche. Inoltre, l'aumento dell'endotelina-1 (ET-1) dopo l'esposizione al freddo è stato collegato a lesioni miocardiche, attraverso la regolazione di proteine chiave come GSK3 β e TPRV1, che sono cruciali per l'integrità mitocondriale e la funzione cardiaca.

D'altro canto, l'esposizione a temperature estremamente elevate provoca lesioni termiche all'endotelio vascolare, attivando le vie della coagulazione e della fibrinolisi. Questo può portare a trombosi microvascolare o sanguinamento eccessivo, e contribuire all'insufficienza multiorgano e alle malattie cardiovascolari. Le risposte infiammatorie sistemiche e la coagulopatia da consumo sono processi chiave in questo contesto.

L'attività simpatica cronica e le risposte simpatiche acute agli stimoli stressanti, come le variazioni estreme di temperatura, possono aumentare il rischio di ipertensione e malattie cardiovascolari. Inoltre, l'aria fredda può innescare riflessi ortosimpatici polmonari, aumentando i processi di aterotrombotici e le aritmie. [1]

1.5 Impatti dell'inquinamento atmosferico sul Sistema Nervoso Autonomo e le malattie Cardiovascolari

L'inquinamento atmosferico, in particolare il particolato, ha dimostrato di avere effetti deleteri sul sistema cardiovascolare attraverso meccanismi complessi che coinvolgono il sistema nervoso autonomo. Sebbene il percorso preciso attraverso cui il PM influisce sul rischio cardiovascolare non sia ancora completamente compreso, sono stati identificati diversi potenziali meccanismi biologici che spiegano come gli inquinanti inalati possano danneggiare il sistema cardiovascolare (Figura 3).

Le particelle depositate nell'albero polmonare possono alterare l'equilibrio autonomo sistemico, portando a una riduzione dell'attività del sistema nervoso parasimpatico e/o all'attivazione del sistema nervoso simpatico. Questi effetti possono essere innescati direttamente, stimolando i riflessi neurali polmonari, o indirettamente, provocando stress ossidativo e infiammazione nei polmoni, o attraverso una combinazione di entrambi. Le alterazioni del tono autonomo possono contribuire ad aumentare la pressione sanguigna, causare vasocostrizione, rendere instabile una placca vascolare o innescare aritmie cardiache.

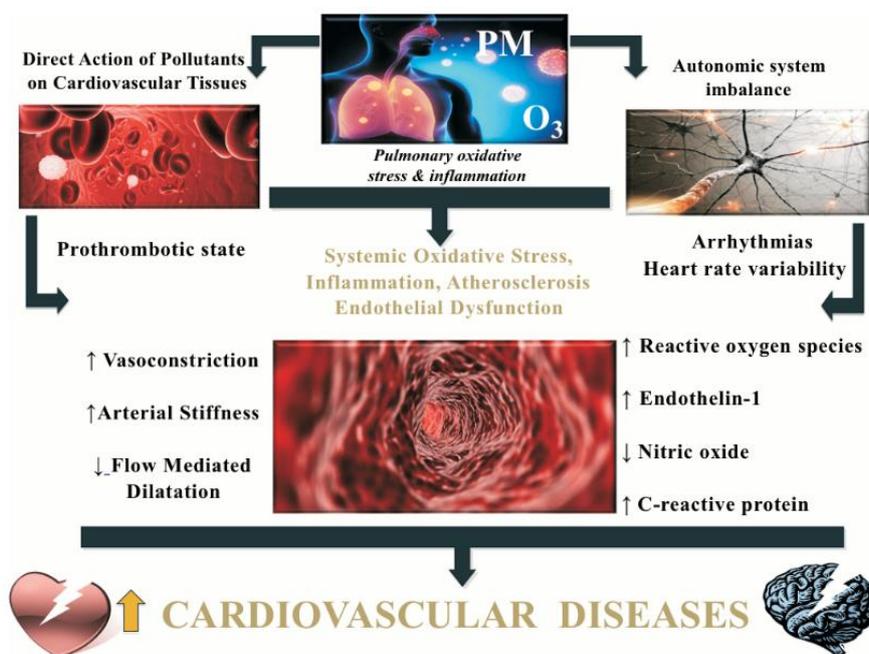


Figura 3: Meccanismi attraverso i quali l'inquinamento atmosferico può influenzare il sistema vascolare e aumentare le malattie cardiovascolari. [1]

Il sistema nervoso autonomo controlla parametri vitali come la frequenza cardiaca, la variabilità della frequenza cardiaca e il recupero della frequenza cardiaca, collegando i cambiamenti autonomici con la mortalità e la morbilità. Numerosi studi hanno mostrato un legame tra i livelli di inquinamento atmosferico e i cambiamenti nella variabilità della frequenza cardiaca, la propensione all'ischemia e le aritmie, in soggetti anziani o in pazienti con malattie cardiovascolari. Ad esempio, lo studio Framingham Heart ha dimostrato che nei soggetti anziani una ridotta variabilità della frequenza cardiaca è associata a un aumento sostanziale degli eventi cardiaci maggiori. [1]

1.6 Influenza del particolato sulla funzione vascolare e l'arteriosclerosi

L'inquinamento atmosferico, in particolare il particolato, ha dimostrato di influenzare negativamente la funzione vascolare e di accelerare lo sviluppo dell'arteriosclerosi attraverso l'infiammazione vascolare e lo stress ossidativo. La disfunzione endoteliale indotta dal PM, che precede i cambiamenti morfologici aterosclerotici, gioca un ruolo cruciale nella modulazione negativa della risposta emodinamica e nella progressione delle lesioni aterosclerotiche. L'endotelio, essendo il regolatore chiave della funzione vascolare, modula il tono vascolare, l'emostasi e l'infiammazione nel sistema cardiovascolare.

Studi hanno dimostrato che l'esposizione al PM_{2.5}, alle particelle ultrafini (UFP) e ai gas di scarico diesel può provocare disfunzione endoteliale sistemica. Gli inquinanti riducono la disponibilità di ossido nitrico (NO) attraverso l'attivazione delle specie reattive dell'ossigeno (ROS) e il disaccoppiamento della sintasi dell'ossido nitrico endoteliale. Nei modelli animali, il PM_{2.5} induce disfunzione endoteliale e attivazione del segnale Rho/ROCK (Roh Associated protein kinase) aumentando la sensibilità al calcio. Studi controllati hanno mostrato che i gas di scarico diesel compromettono acutamente le risposte dei vasi sanguigni a diversi mediatori, aumentando l'endotelina-1 (ET-1) e potenziando la depressione del segmento ST indotta dall'esercizio e il carico ischemico.

L'inquinamento atmosferico facilita diverse vie pro-aterogeneiche. In primo luogo, la formazione di fosfolipidi e colesterolo altamente ossidati aumenta l'infiammazione e accelera il processo aterosclerotico. Questi mediatori reattivi provocano disfunzione endoteliale, aumentano l'espressione di molecole di adesione e fattori di crescita, promuovono la proliferazione e migrazione delle cellule endoteliali e regolano la formazione delle cellule schiumose. In secondo luogo, il PM ambientale fine e ultrafine provoca la produzione di lipoproteine ad alta densità (HDL) disfunzionali, che perdono le loro proprietà anti-infiammatorie e antiossidanti. In terzo luogo, il PM_{2.5} viene riconosciuto dai macrofagi intimali tramite i recettori toll-like (TLR), portando al rilascio di citochine e proteine

chemiotattiche attraverso l'attivazione della via NF- κ B. I monociti reclutati dalle LDL ossidate e dal PM2.5 si differenziano in macrofagi intimali, assimilando le LDL ossidate e formando cellule schiumose. È stato ipotizzato che i macrofagi possano assimilare il PM2.5 e poi subire apoptosi, generando detriti cellulari e facilitando la formazione del nucleo necrotico. [1]

1.7 Effetti Diretti degli inquinanti atmosferici sui tessuti cardiovascolari

Alcuni componenti del particolato (PM), come le particelle ultrafini (UFP) e i metalli solubili, una volta inalati, possono rapidamente passare dall'epitelio polmonare alla circolazione sanguigna e interagire direttamente con il sistema cardiovascolare. Queste piccole particelle non solo possono influenzare l'endotelio vascolare e le placche aterosclerotiche, ma possono anche provocare infiammazione locale e stress ossidativo. In particolare, è stato dimostrato che alcuni composti stimolano il recettore dell'angiotensina II di tipo 1 e la segnalazione del fattore di crescita epidermico, potenzialmente interferendo con le attività delle fosfatasi. Altri agenti chimici, come i metalli di transizione, le molecole organiche e le semi-chinoni, possono influenzare il ciclo redox dei tessuti biologici, aumentare i livelli di specie reattive dell'ossigeno (ROS) nei tessuti vascolari e disturbare l'equilibrio vasomotorio. Questi processi possono contribuire a una serie di effetti negativi sul sistema cardiovascolare, aggravando le condizioni patologiche esistenti e aumentando il rischio di sviluppare nuove malattie cardiovascolari. [1]

2. Il gas naturale in Italia

2.1 Filiera del gas naturale in Italia

L'Italia importa dall'estero il 90% del gas naturale che utilizziamo tramite 2 modi: in primo luogo attraverso le **navi metaniere**, che trasportano *gas naturale liquefatto (GNL)* a -160°C , il quale, successivamente viene riconvertito allo stato gassoso tramite i *terminali di rigassificazione* e, in secondo luogo, attraverso la **rete nazionale dei gasdotti (RNG)** collegata con i metanodotti delle nazioni produttrici come Algeria, Azerbaigian, Russia (anche se la percentuale attualmente è crollata rispetto agli altri anni a causa della guerra), Libia e Nord Europa.

Come possiamo vedere in Figura 4, il gas una volta arrivato nel nostro paese, al fine di fronteggiare le variazioni improvvise della domanda e i casi di emergenza, viene stoccato tramite gli appositi **impianti di stoccaggio del gas naturale**, i quali non sono altro che dei giacimenti esauriti di gas naturale riadattati all'uso di deposito. Questo lo si fa per due motivi principali:

- Per una questione **logistica** in quanto bisogna considerare che si tratta di volumi molto grandi, la cui capacità massima complessiva è di 17 miliardi di m^3 di cui 4,5 miliardi di m^3 di riserva strategica, quindi se questi volumi fossero stoccati in superficie, ad esempio nei silos, rappresenterebbero una distesa più che rilevante;
- Per **maggiore sicurezza**, infatti geologicamente non esiste niente di più sicuro di questi vecchi giacimenti che hanno già contenuto il gas per milioni di anni.



Figura 4: Filiera del gas naturale, immagine schematica delle strutture coinvolte nella distribuzione del gas naturale.[11]

Come vediamo in Figura 5, i giacimenti sono costituiti da rocce porose e permeabili, dette **rocce serbatoio**, che si lasciano attraversare dal gas e che sono sormontate da **rocce impermeabili**, le quali trattengono i fluidi al di sotto.

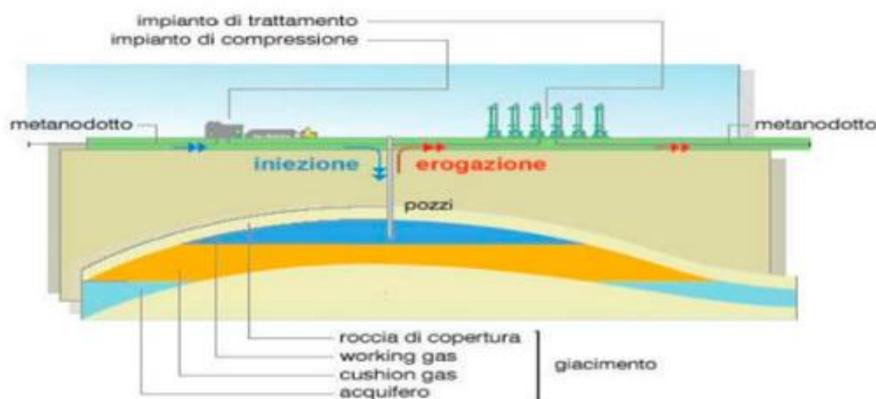
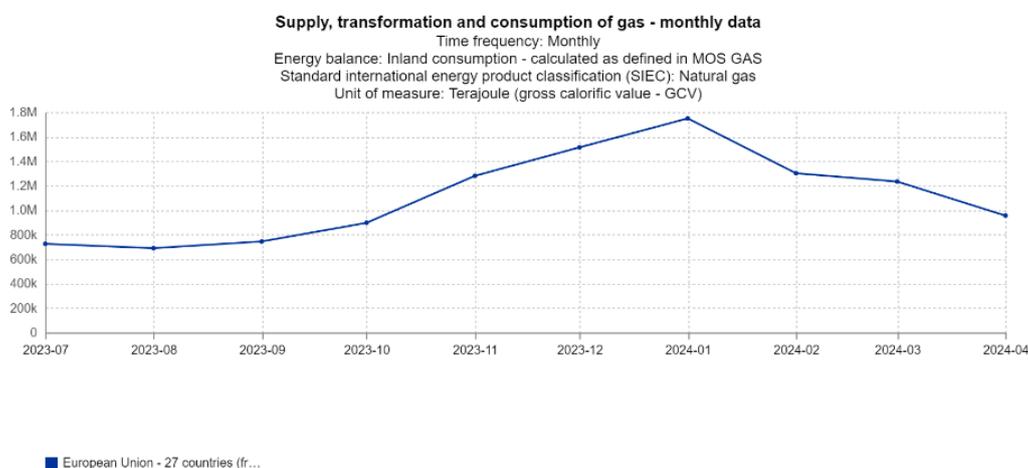


Figura 5: Struttura e funzionamento di un sito di stoccaggio.

Considerando che ogni anno consumiamo circa 70 miliardi di m³ di gas, la capacità massima potrebbe soddisfare il fabbisogno nazionale per circa 4 mesi, tuttavia bisogna tenere in considerazione che la capacità massima fa riferimento al volume di gas quando i giacimenti di stoccaggio sono pieni, cosa che non avviene sempre. Il consumo del gas naturale, infatti, varia stagionalmente come vediamo in Figura 6: nelle stagioni più calde non ci sarà bisogno di molto gas perché ad esempio non c'è bisogno di accendere il riscaldamento, viceversa nella stagione invernale il consumo del gas aumenta. Ogni anno i giacimenti di stoccaggio vengono riempiti e svuotati (non interamente) in quanto c'è una **fase di iniezione in estate** (periodo in cui prepariamo le riserve) e una **fase di erogazione durante l'inverno**.



Source of data: Eurostat (online data code: nrg_cb_gasm)
 Last update: 24/05/2024 23:00

This graph has been created automatically by ESTAT/EC software according to external user specifications for which ESTAT/EC is not responsible.
 General disclaimer of the EC website: https://ec.europa.eu/info/legal-notice_en.html

eurostat

Figura 6: Grafico in base a dati prelevati dall'EUROSTAT del consumo mensile del gas naturale in Italia.

Sempre seguendo lo schema in Figura 4, il gas una volta arrivato alle “porte di importazione” (posizionate in vari punti strategici ai confini della penisola come vediamo in Figura 7) ed essere stoccato passa alla **rete di distribuzione**, formata da circa 300.000km di tubazioni che trasportano il gas dai luoghi di produzione e di stoccaggio fino alle nostre case.

In particolare possiamo identificare tre tipi di reti (due di queste visibili in Figura 7) che vengono usate per instradare il gas verso le nostre abitazioni: la **rete di trasporto**, che permette il trasferimento del gas dai luoghi di estrazione fino alle *cabine di primo salto (RE.MI)* che sono i punti di distribuzione primari, la **rete di distribuzione**, che permette lo smistamento del gas al livello provinciale e comunale, per poi arrivare ai *gruppi di riduzione finale (GRF)* da dove inizia la **rete di utilizzo** che convoglia il gas verso le caldaie domestiche o industriali.

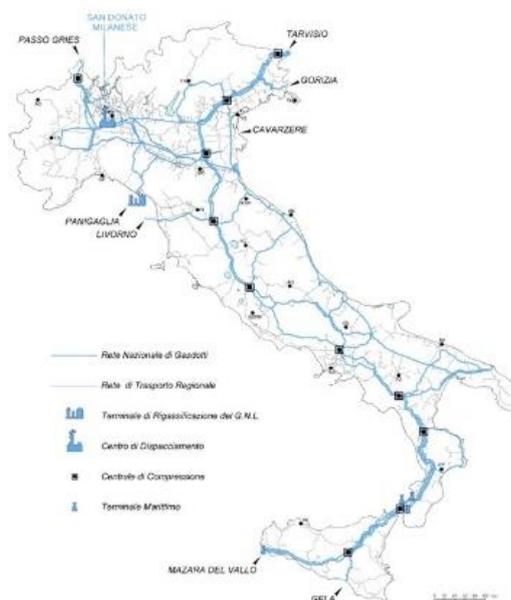


Figura 7: Mappa Rete Nazionale Gasdotti (RN), Rete di trasporto Regionale (RR) e le 7 principali "porte di importazione" in Italia.

Una volta che il gas raggiunge i punti di distribuzione locali viene immesso nella **rete locale** che raggiunge le case o le industrie. Il gas destinato al consumo immediato viene gestito dalle società distributrici locali e venduto dalle **società di fornitura** che rivendono ai clienti finali il gas che hanno acquistato sul mercato all'ingrosso utilizzando le varie tariffe sotto il controllo dell'**ARERA**.

Richiamando la Figura 8, è evidente come le pressioni di esercizio variano in base al tipo di rete che il gas sta attraversando: si parla di **Rete ad Alta Pressione** (40/70 bar) tra il metanodotto di trasporto nazionale e le cabine RE.MI (Regolazione e misura), le quali riducono la pressione fino a 4/5bar per permettere il passaggio nella **Rete in Media Pressione** lungo la rete di distribuzione, dove grazie ai

GRF la pressione viene ridotta ulteriormente passando alla **Rete a Bassa Pressione** (20/25mmBar) che comprende la rete di utilizzo per poter essere utilizzata dagli utenti finali.



Figura 8: Schema delle varie pressioni di esercizio. [11]

Tali riduzioni di pressione sono possibile tramite due organi fondamentali per la distribuzione del gas, ossia:

- Le cabine **RE.MI** (Regolazione e misura) che rappresentano l’interfaccia tra la rete di trasporto nazionale e la rete di distribuzione locale, rappresentando il punto di passaggio dall’alta alla media pressione. Le funzioni principali di questa cabina sono: il preriscaldamento del gas, la riduzione e regolazione, la misurazione della pressione, l’odorizzazione del gas e il telecontrollo. Si tratta di impianti di “Pubblica Utilità”, quindi non arrestabili, pertanto sono richieste due linee in parallelo. Gli impianti devono essere progettati in ogni loro singolo componente, in modo tale da **garantire la continuità di servizio** anche in caso di malfunzionamenti, guasti o blackout.

Come vediamo in Figura 9, ciascuna delle linee è composta da una valvola d’intercettazione all’ingresso, filtro con separatore di condensa, preriscaldatore, organo di regolazione (regolatore pilotato), organo di sicurezza (monitor) e valvola d’intercettazione in uscita. A valle della riduzione vi è la misura e, successivamente, il processo di odorizzazione del gas.

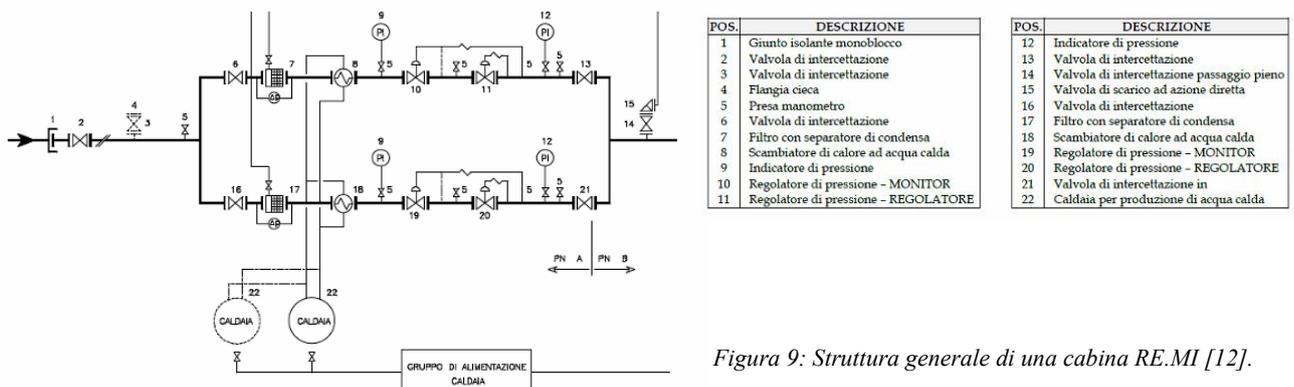


Figura 9: Struttura generale di una cabina RE.MI [12].

Il gas, una volta fornito alla cabina REMI da un gasdotto ad alta pressione viene, prima di qualsiasi altra operazione, fatto passare attraverso dei filtri per rimuovere eventuali impurità, particelle solide e contaminanti che potrebbero danneggiare l'attrezzatura a valle o compromettere la qualità del gas fornito agli utenti. Dato che il processo di riduzione della pressione può causare un abbassamento significativo della temperatura del gas (**effetto Joule-Thomson**), è spesso necessario preriscaldare il gas per prevenire la formazione di ghiaccio nelle apparecchiature di regolazione. Il preriscaldamento avviene utilizzando scambiatori di calore (mostrati in Figura 10), che riscaldano il gas sfruttando acqua calda prodotta da caldaie e fatta passare in una camicia di rivestimento delle tubature.

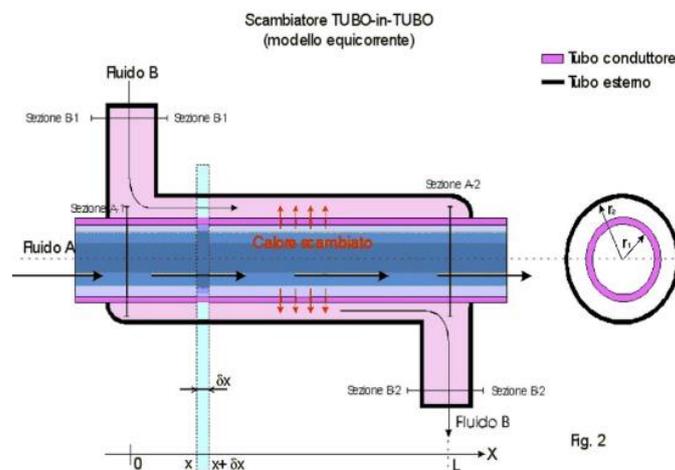


Figura 10: Scambiatore di calore cabina REMI.

In seguito, il gas subisce il processo di riduzione effettuando - il così detto “primo salto” - portando la pressione a circa 4/5bar grazie alla **valvola di riduzione della pressione (PVR) o valvola di intercettazione**, la quale regola l’apertura e la chiusura del passaggio del gas che consente un flusso costante e controllato. La PVR è modulata dai **regolatori di pilotaggio** in base alla pressione che rilevano a valle (quindi dopo la valvola di regolazione), tramite degli appositi **sensori** posti a monte e a valle della PVR. Il regolatore pilota monitora costantemente la pressione a valle della PRV. Se la pressione scende al di sotto del livello desiderato, il pilota aumenta l'apertura della PRV, permettendo a più gas di passare e aumentare la pressione a valle. Se la pressione è troppo alta, il pilota riduce l'apertura della PRV, diminuendo il flusso di gas e riducendo la pressione. Una volta che il gas ha attraversato la PRV, la sua pressione è stabilizzata a un livello sicuro e utilizzabile. Questo livello di pressione è adeguato per la distribuzione locale e garantisce al gas di essere utilizzato in sicurezza e efficientemente da abitazioni, aziende e industrie.

Dopodiché, parallelamente alla regolazione, il gas viene **misurato** per determinare il volume esatto di gas che passa attraverso la cabina. Questa operazione è essenziale per la fatturazione e per monitorare i flussi di gas nella rete di distribuzione che, solitamente, si compone di un **contatore** con emettitore di impulsi, trasduttori di pressione e temperatura e da un calcolatore di processo con schede di telelettura. I segnali dei trasduttori e gli impulsi del contatore vengono inviati al calcolatore che analizza in tempo reale i dati e fornisce la portata istantanea elaborata dalla stazione, dopodiché i dati sono trasferiti su carta attraverso una stampante in modo tale da renderli facilmente analizzabili durante i controlli giornalieri.

Infine, prima di essere distribuito, in conformità a quanto previsto dalla **legge 1083/1973**, il gas viene sottoposto al **processo di odorizzazione**, che stabilisce che il distributore è responsabile della corretta odorizzazione del gas naturale fornito agli utenti finali. Tale processo viene effettuato tramite un apposito impianto di iniezione e tra i principali odorizzanti troviamo il **TBM** e **THT** la cui quantità è regolata dalle normative **UNI 71-33** e **UNI EN 1776**. Il livello di odorizzazione deve essere monitorato sistematicamente durante i periodi di massima e minima portata, infatti sono dei gas tossici contenuti benzene e idrocarburi aromatici che necessita di analisi del gas in rete da personale specializzato esterno.

Tutte le cabine RE.MI devono essere conformi al **DM 16/04/2008** “Regola tecnica per la progettazione, costruzione, collaudo, esercizio e sorveglianza delle opere e dei sistemi di distribuzione e di linee dirette del gas naturale con densità non superiore a 0,8”.

Sul piano normativo è altrettanto fondamentale attenersi alla normativa **UNI CIG 9167**, in tema di progettazione, costruzione e installazione che si compone di 3 parti: la **parte 1** stabilisce i termini e le definizioni relativamente alle stazioni di controllo della pressione e di misura del gas; la **parte 2** fornisce i criteri principali di progettazione, costruzione e collaudo degli impianti di controllo della pressione dei gas combustibili della prima e della seconda famiglia, come definiti nella UNI EN 437², situati a valle dei punti di riconsegna dal trasportatore a distributore, clienti finali o altre reti di trasporto; la **parte 3** può essere presa come riferimento anche per la progettazione, costruzione e collaudo dei sistemi di misura del gas naturale situati a monte dei punti di consegna alle reti di trasporto da impianti di rigassificazione, impianti di stoccaggio o produzioni nazionali.

² La norma **UNI EN 437** specifica i gas di prova, le pressioni di prova e le categorie di apparecchi relativamente all'utilizzo di gas combustibili della prima, seconda e terza famiglia (RE.MI e GRF). Essa costituisce un documento di riferimento per le norme specifiche relative agli apparecchi. La norma fornisce raccomandazioni sull'utilizzo dei gas e delle pressioni da applicare nelle prove degli apparecchi che utilizzano gas combustibili.

- I **GRF (Gruppi di Riduzione Finale)** ricevono il gas dalle condotte esercitate in Media Pressione e ne riducono la pressione, generalmente, a non oltre 0,04 bar, alimentando le condotte esercitate in Bassa Pressione e quindi adibite al trasporto urbano del gas. Come possiamo vedere in Figura 11, i principali componenti sono: un filtro a cartuccia, due gruppi di regolazione, una valvola in entrata e una in uscita, un misuratore volumetrico, dei convertitori di volumi e un gruppo di misura GDM (normato dalla UNI 11291).

I GRF devono rispettare la normativa **UNI 8827-1:2015**, la quale specifica i requisiti dei nuovi sistemi di controllo della pressione per gas canalizzati, che sono alimentati da condotte con MOPU ≤ 5 bar, funzionanti con pressione a valle non maggiore di 0,04 bar per gas della prima e seconda famiglia secondo la UNI EN 437, impiegati per alimentare una rete di distribuzione o direttamente le utenze domestiche o similari, nonché i requisiti specifici dei sistemi di controllo con portate termiche $\leq 1\ 200$ kW.

Inoltre, i GRF devono essere conformi anche con la **UNI 10619-1:2023** la quale non solo fornisce i termini e le definizioni, ma prescrive anche i criteri per la progettazione, la costruzione e collaudo degli alloggiamenti e parti comuni: in particolare dei sistemi di controllo della pressione; dei sistemi di misura, dei sistemi di controllo della pressione e dei sistemi di misura, per gas combustibili della prima e seconda famiglia (in accordo alla UNI EN 437), alimentati da condotte con MOPU ≤ 12 bar, poste a valle di una stazione di controllo della pressione e misura del gas naturale.

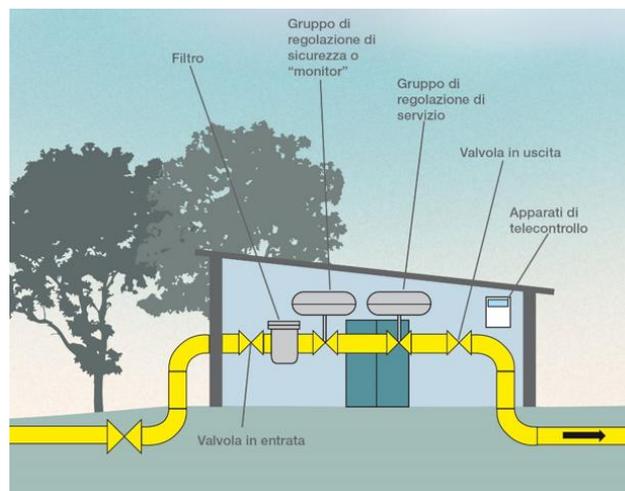


Figura 11: Schema sintetico cabina con GRF. [11]

Sia nelle cabine RE.MI sia nei GRF sono presenti i **riduttori di pressione pilotati**. Si tratta di apparecchiature che permettono di modulare, a seconda delle necessità, la pressione a valle del riduttore, differenziandosi nettamente da un normale riduttore di pressione. Quest'ultimo segue il seguente meccanismo: quando aumenta la portata richiesta, la pressione a valle diminuisce rispetto

alla pressione di taratura. Questo accade poiché cresce la perdita di carico interna del dispositivo. Diversamente, i riduttori di pressione pilotati presentano una importante particolarità costruttiva perché permettono di mantenere ad un valore costante la pressione a valle, in maniera indipendente sia dalle variazioni di portata, sia dalle variazioni della pressione a monte.

Come si nota nella Figura 12, i principali componenti di un riduttore di pressione pilotato sono:

- **Valvola principale**, al cui interno si trova un **otturatore** collegato alla membrana con un apposito **stelo**;
- **Circuito di by-pass**;
- **Riduttore di pressione pilota**, ovvero un riduttore di pressione ad azione diretta installato sul circuito di by-pass.

Il funzionamento è comandato dal riduttore di pressione pilota, mentre la valvola principale funge da “amplificatore” di ciò che avviene su di esso.

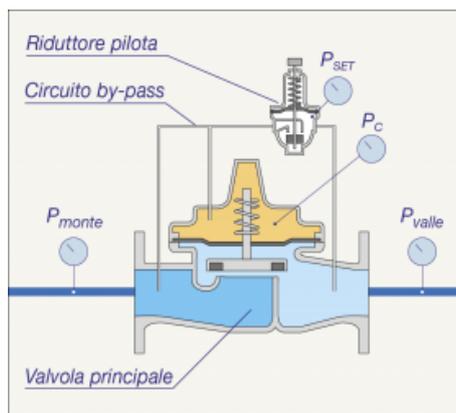


Figura 12: Principali componenti di un riduttore di pressione pilotato

La valvola principale è dotata di una camera superiore collegata al circuito di by-pass tramite una presa di pressione. Sulla parte superiore della membrana agisce la pressione a monte del riduttore pilota, cd. **pressione di controllo** (P_c). Sulla parte inferiore della membrana agisce invece la cd. **pressione a valle** (P_{valle}). Di conseguenza, il movimento dell'otturatore della valvola principale dipende dalla differenza tra la P_c e la P_{valle} .

- **Funzionamento in chiusura** (Figura 13): Sul riduttore di pressione pilota è possibile effettuare la taratura della **pressione di valle desiderata** (P_{SET}). Il suo funzionamento in sé è analogo a quello di un riduttore tradizionale, ma ha l'ulteriore effetto di “pilotare” la valvola principale.

Quando la **pressione di valle aumenta**, all'interno del riduttore pilota l'otturatore si muove verso la posizione di chiusura (come in un tradizionale riduttore di pressione). Di conseguenza la portata all'interno del circuito di by-pass diminuisce e la pressione di controllo (P_c) tende ad aumentare. Questo aumento di pressione esercita una forza sulla membrana della valvola principale, spingendo il suo otturatore verso il basso e portandolo in posizione di chiusura.

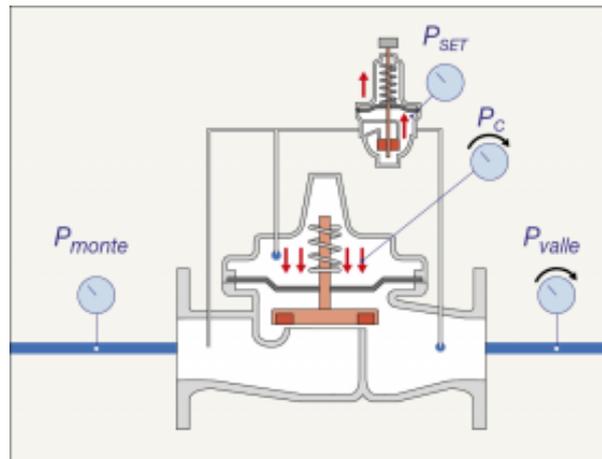


Figura 13: Funzionamento in chiusura del riduttore di pressione pilotato.

- **Funzionamento in apertura** (Figura 14): Quando la **pressione a valle diminuisce**, al contrario, il riduttore di pressione pilota si apre di più, aumentando la portata nel circuito di by-pass. Di conseguenza, la pressione di controllo (P_c) che agisce sulla parte superiore della membrana principale si riduce. Per questo motivo, l'otturatore della valvola principale viene spinto verso l'alto, favorendo l'apertura.

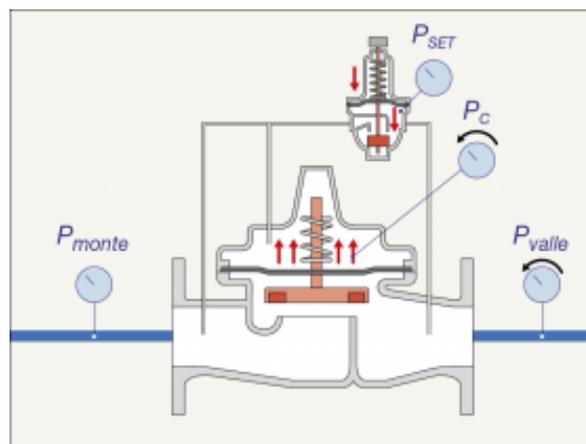


Figura 14: Funzionamento in apertura del riduttore di pressione pilotato.

Normalmente, i gruppi di riduzione di pressione utilizzano due piloti in serie (Figura 15), uno dei quali è chiamato **monitor** e subentra all'altro chiamato **regolante**.

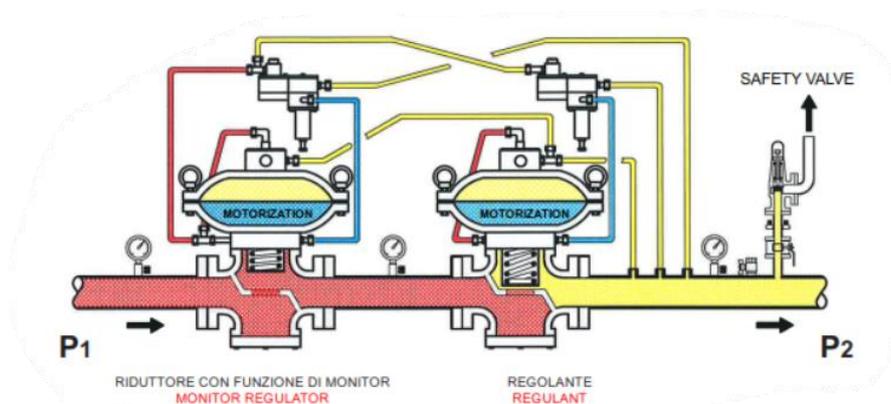


Figura 15: Monitor disattivo.

Il **monitor** è un regolatore di emergenza che rimane inattivo (Figura 15) finché il **regolante** funziona correttamente. Il monitor entra in funzione (Figura 16) se, per qualche motivo, il regolante permette alla pressione che è a valle di salire fino al suo valore di intervento. Il monitor deve quindi avere una taratura più alta del riduttore regolante ed è costruito per poter lavorare sia con salto di pressione ($P1 > P2$) sia con una pressione in uscita uguale a quella di entrata.

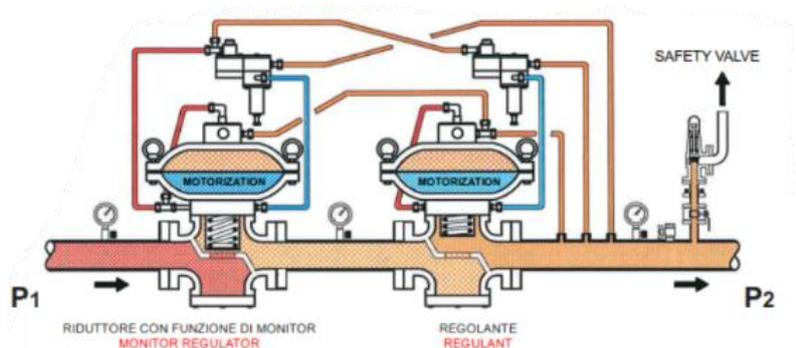


Figura 16: Entrata in funzione del monitor.

Le condotte che alimentano e che si dipartono a valle degli impianti di riduzione della pressione si classificano in:

- **condotte di 1^a specie:** condotte con pressione massima di esercizio (MOP) superiore a 24 Bar (2,4 MPa);
- **condotte di 2^a specie:** condotte con pressione massima di esercizio (MOP) superiore a 12 Bar (1,2 MPa) ed inferiore od uguale a 24 Bar (2,4 MPa);
- **condotte di 3^a specie:** condotte con pressione massima di esercizio (MOP) superiore a 5 Bar (0,5 MPa) ed inferiore od uguale a 12 Bar (1,2 MPa);

- **condotte di 4^a specie:** condotte con pressione massima di esercizio (MOP) superiore a 1,5 Bar (0,15 MPa) ed inferiore o uguale a 5 Bar (0,5 MPa);
- **condotte di 5^a specie:** condotte con pressione massima di esercizio (MOP) superiore a 0,5 Bar (0,05 MPa) ed inferiore od uguale a 1,5 Bar (0,15 MPa);
- **condotte di 6^a specie:** condotte con pressione massima di esercizio (MOP) superiore a 0,04 Bar (0,004 MPa) ed inferiore od uguale a 0,5 Bar (0,05 MPa);
- **condotte di 7^a specie:** condotte con pressione massima di esercizio (MOP) inferiore od uguale a 0,04 Bar (0,004 MPa).

Le condotte di gas sono prevalentemente interrato per garantire sicurezza, protezione dagli agenti atmosferici e la massima integrità strutturale. Vengono posate su suolo pubblico o privato, seguendo tracciati che evitano aree ad alto rischio come quelle sismiche o in prossimità di infrastrutture critiche. La profondità e la distanza dalle altre infrastrutture sono regolate da normative specifiche volte ad evitare interferenze e garantire la sicurezza.

I principali materiali utilizzati per la costruzione delle condotte sono:

- **Acciaio:** Utilizzato soprattutto per le condotte di alta pressione e quelle principali di media pressione, grazie alla sua robustezza e resistenza alle alte pressioni;
- **Ghisa:** Utilizzata storicamente, ma sempre meno frequente per le nuove installazioni a causa della sua fragilità;
- **Polietilene (PE):** Molto comune nelle reti di distribuzione a bassa pressione e media pressione, essendo flessibile, resistente alla corrosione e facile da installare;
- **Rame:** Utilizzato per impianti domestici e collegamenti di breve lunghezza.

Le normative che regolano la progettazione, costruzione, collaudo e manutenzione delle reti di distribuzione del gas sono fondamentali per garantire sicurezza e affidabilità.

In Italia la normativa **UNI 9165** stabilisce i criteri per la progettazione, costruzione, collaudo, gestione, manutenzione e risanamento delle condotte che operano con una pressione massima di esercizio (MOP) non superiore a 0,5 MPa (5 bar). Queste condotte trasportano **gas combustibili appartenenti alla I, II e III famiglia**³ secondo quanto specificato nella norma UNI EN 437. La

³ I gas combustibili sono classificati in tre famiglie principali secondo la norma UNI EN 437:

1. **Prima Famiglia** → **Gas di città:** Comprende il gas di città o gas d'acqua, che è una miscela di vari gas prodotti dalla gassificazione del carbone.
2. **Seconda Famiglia** → **Gas naturale:** Questo gruppo comprende il gas naturale, costituito principalmente da metano (CH₄), e le miscele di gas naturali.
3. **Terza Famiglia** → **Gas di petrolio liquefatti (GPL):** Include propano, butano e le loro miscele

normativa si applica anche alle condotte esistenti, ma solo per le sezioni che subiscono modifiche sostanziali in termini di capacità, tracciato o concezione della condotta stessa.

Per prevenire la corrosione delle condotte in acciaio, è spesso utilizzata la **protezione catodica**. Questo sistema si basa sull'alterazione del potenziale elettrico del metallo della tubazione attraverso l'imposizione di una corrente anodica controllata. Il processo di progettazione comprende:

- **Indagini geologiche:** dove si raccolgono dati sul pH, la resistività del terreno, l'attività microbiologica e la presenza di correnti disperse. Questi dati sono cruciali per determinare la geometria della rete, le caratteristiche di isolamento della tubazione e le specifiche geologiche del terreno;
- **Soluzioni Tecnico-Economiche:** basandosi sulle teorie più accreditate, vengono elaborate diverse soluzioni progettuali. La scelta finale ricade sulla soluzione più conveniente dal punto di vista tecnico ed economico, anche se la verifica definitiva avviene solo dopo l'attivazione e il monitoraggio del sistema.

Questo metodo si attua facendo circolare una **corrente continua** fra un elettrodo (**anodo**) posto nell'ambiente e la superficie della struttura da proteggere (**catodo**): tale corrente provoca la diminuzione del potenziale del materiale metallico e riduce la velocità di corrosione fino al suo arresto. La modalità con cui si realizza la circolazione di corrente definisce i due tipi di protezione catodica:

1. **Corrente Impressa:** un alimentatore esterno fornisce una corrente anodica alla tubazione, alterando il potenziale elettrico del metallo per prevenire la corrosione. Questo è ottenuto collegando il polo negativo dell'alimentatore alla tubazione e il polo positivo a un anodo dispersore.
2. **Anodi Dispensori:** gli anodi, spesso fatti di ferro-silicio o titanio attivato, sono immersi nel terreno a una distanza variabile dalla tubazione. Questi anodi creano un potenziale di protezione sulla tubazione, generalmente non maggiore di -0,85 V rispetto a un elettrodo di riferimento rame/solfato di rame saturo (Cu/CuSO₄).

L'organismo tecnico competente per definire le linee guida nel campo della protezione catodica di condotte metalliche è l'**Associazione per la Protezione dalle Corrosioni Elettrolitiche (A.P.C.E.)**, che definisce criteri di valutazione dell'efficacia dei sistemi di protezione catodica degli impianti di distribuzione del gas.

La normativa stabilisce che il potenziale di protezione deve essere di -0,85 V in condizioni normali e di -0,95 V in condizioni anaerobiche. Un potenziale troppo negativo, inferiore a -1,10 V, indica sovraprotezione, che può danneggiare la tubazione.

L'attività elettrica di ogni impianto viene monitorata attraverso misurazioni dei potenziali della tubazione. Questo avviene tramite punti di misura distribuiti lungo la rete, visibili come colonnine a lato strada che permettono l'accesso ai contatti per le misure.

La protezione catodica è quindi un sistema complesso che richiede un'accurata progettazione, installazione e monitoraggio continuo per garantire la longevità e la sicurezza delle reti di distribuzione del gas naturale.

2.2 Le emissioni di metano

Negli ultimi vent'anni e fino a poco tempo fa, al gas naturale è stato attribuito un ruolo significativo nelle **strategie di decarbonizzazione**. Tuttavia, l'attenzione verso il metano (CH_4) è stata piuttosto limitata in considerazione del fatto che si riscontrano significative incertezze riguardo alle sue sorgenti, alle modalità di emissione, nonché agli impatti climatici e ambientali.

Nello specifico il metano è l'idrocarburo che, oltre ad essere il componente principale del gas naturale, è anche un potente gas-serra (*greenhouse gas*, GHG). La presenza del metano nell'atmosfera influisce sulla temperatura terrestre e sul sistema climatico in quanto è **il secondo gas-serra di origine antropica più abbondante** dopo l'anidride carbonica (CO_2).

Sul piano storico è chiaro che attualmente la quantità di CH_4 presente nell'atmosfera è aumentata del 47% rispetto all'epoca preindustriale (1750), rappresentando il **20% delle emissioni globali**. Negli anni '90, le concentrazioni di metano si erano stabilizzate, ma a partire dal 2007 hanno ripreso a crescere a una media di $7,6 \pm 2,7$ ppb/anno (2010-2019). Secondo le valutazioni del Working Group I dell'IPCC, questo incremento è attribuibile principalmente alle emissioni provenienti dai combustibili fossili e dall'agricoltura, in particolare dall'allevamento di bestiame [13].

Osservando la Figura 17, possiamo vedere come il metano viene rilasciato da una vasta gamma di fonti sia antropogeniche (causate dall'uomo) sia naturali.

Le fonti di emissione **antropogeniche** includono discariche, produzione e utilizzo di petrolio e gas naturale, attività agricole (come le risaie), estrazione del carbone, processi di combustione sia stazionaria che mobile, trattamento delle acque reflue e alcuni processi industriali. Per quanto

riguarda le fonti **naturali**, le emissioni principali provengono da zone umide, corpi idrici interni come laghi, piccoli stagni e fiumi, fenomeni geologici del suolo, animali selvatici, termiti, scongelamento del permafrost terrestre e marino e fonti oceaniche (biogeniche, geologiche e idrate) [14]. Alcune di queste fonti, come le torbiere e i campi geotermici, possono essere influenzate dalle attività umane e, in tali casi, sono classificate come **sorgenti antropogeniche** secondo le Linee-guida IPCC per gli inventari nazionali [15].

Il metano è un gas-serra più potente dell'anidride carbonica e porta anche alla produzione di vapore acqueo nella stratosfera mediante reazioni chimiche, aumentando così il riscaldamento globale anche in via indiretta, ma ha una **vita media in atmosfera più breve**, quindi il raggiungimento di riduzioni significative avrebbe un effetto più rapido e significativo sul potenziale di riscaldamento atmosferico rispetto alla CO_2 ed è pertanto una strategia efficace per raggiungere gli obiettivi climatici dell'**accordo di Parigi** ⁴del 2015.

Per tener conto dell'impatto sul sistema climatico di più gas-serra differenti, l'IPCC prende in considerazione nei suoi diversi rapporti due indici: il **GWP (Potenziale di Riscaldamento Globale o *Global Warming Potential*)** ed il **GTP (Potenziale di cambiamento della Temperatura Globale o *Global Temperature-change Potential*)**. La base di tutti gli indici di emissione (*emission metrics*) è il **profilo temporale del forcing radiativo effettivo (ERF)** a seguito dell'emissione di un particolare composto.

Il **GWP** misura il *forcing radiativo*⁵ in seguito all'emissione di una massa unitaria di una determinata sostanza, accumulato rispetto un orizzonte temporale prescelto (20,100, 500 anni), e riferito a quello della sostanza di riferimento, l'anidride carbonica (CO_2). Rappresenta quindi l'effetto combinato dei diversi tempi di permanenza di queste sostanze nell'atmosfera e della loro efficienza nel causare forcing radiativo.

Il metano è presente in minore quantità nell'atmosfera rispetto alla CO_2 , può assorbire le radiazioni infrarosse in maniera più efficiente, conseguentemente, presenta un **GWP circa 80 volte più alto** per unità di massa della CO_2 su una scala temporale di 20 anni e circa 30 volte più forte su una scala temporale di 100anni. [13]

⁴ L'**accordo di Parigi** è un trattato internazionale stipulato tra gli stati membri della Convenzione quadro delle Nazioni Unite su cambiamenti climatici (UNFCCC) negoziato da 196 Stati, con l'obiettivo di rafforzare la risposta mondiale ai cambiamenti climatici (mantenendo l'aumento della temperatura media mondiale al di sotto dei 2°C rispetto i livelli preindustriali) in un contesto di sviluppo sostenibile e volto a eliminare la povertà.

⁵ Il "**forcing radiativo**" è un termine usato in climatologia per descrivere l'influenza di un fattore (come gas serra o aerosol) sul bilancio energetico della Terra. Ossia la differenza tra l'energia assorbita dalla terra tramite la radiazione solare, riscaldando il pianeta, e l'energia riflessa nello spazio. Il bilancio tra l'energia assorbita e quella emessa determina la temperatura media del pianeta.

Il **Potenziale di Riscaldamento globale a 100 anni (GWP-100)** è comunemente utilizzato nelle politiche climatiche per riportare sulla stessa scala le emissioni dei diversi gas-serra. Attraverso questo indice i Paesi possono esprimere le proprie emissioni di gas-serra e i propri obiettivi di riduzione/limitazione in termini di *CO₂ equivalente*. Da tenere in considerazione è il fatto che questo indice, in genere, tende a sottovalutare il contributo che le riduzioni immediate delle emissioni di CH₄ possono fornire nel rallentare il riscaldamento globale nel breve periodo. Ciò in quanto l'orizzonte temporale che dovrebbe essere considerato dipende dalla data in cui si desidera raggiungere il picco del riscaldamento globale. Se **l'obiettivo è quello di limitare il riscaldamento globale a non più di 1,5°C entro il 2050 e non più di 2°C entro la fine del secolo**, è evidente che l'utilizzo del GWP-100 nel reporting delle emissioni potrebbe non essere indicato, dal momento che questo porta a sovrastimare il contributo dei gas a lunga vita media (come la *CO₂*) e a sottostimare quello dei gas a breve vita media (come il *CH₄*). Risulta quindi evidente che l'unico valore del GWP che risponde alle esigenze legate agli obiettivi dell'Accordo di Parigi è il **GWP-20**.

Le precedenti considerazioni sul GWP-100 mettono in rilievo che il suo uso generalizzato nei documenti ufficiali della UNFCCC e nel reporting delle emissioni nazionali sottovalutano il ruolo del metano negli scenari di decarbonizzazione relativi all'accordo di Parigi. Infatti, come preannunciato, concentrazioni inferiori di metano ridurrebbero rapidamente il tasso di riscaldamento, rendendo **la mitigazione del metano uno dei modi migliori per limitare il riscaldamento in questo decennio e in quelli successivi** per i seguenti motivi:

- la diminuzione delle emissioni di metano non darebbe origine a **meccanismi di offset**, ossia una crescita delle emissioni naturali che andrebbe a compensare la diminuzione di quelle antropogeniche;
- non porterebbe ad effetti sul sistema climatico.

Il contributo del **Gruppo di Lavoro I al Sesto Rapporto di Valutazione dell'IPCC** rafforza le conclusioni dei rapporti precedenti sulla necessità di ridurre il metano. In particolare tale lavoro ha messo in evidenza come per mantenere un percorso di riscaldamento globale a 1,5°C è necessario abbattere circa **un terzo** delle emissioni di metano dai livelli attuali entro il 2030 e circa il **45%** entro il 2040. Sebbene raggiungere lo zero netto di *CO₂* sia indispensabile per conseguire i nostri obiettivi climatici, **ridurre le emissioni di metano costituisce probabilmente il mezzo più efficace per evitare di superare i limiti degli obiettivi**. [13]

Nel 2019 le emissioni di CH_4 in Italia sono state pari a 1.718,69 kt, corrispondenti a **48.123,32 ktCO₂eq**, il 12.9% in meno rispetto al 1990, rappresentando il **10,3% del totale dei gas-serra**. I settori che forniscono il contributo più rilevante alle emissioni di metano sono l'**agricoltura** con il 44.2%, la **gestione dei rifiuti** con il 37,9% e l'**energia** con il 17,9% (di cui l'11% dalle **emissioni fuggitive**⁶ e il 6.9% dai **processi di combustione**). [16]

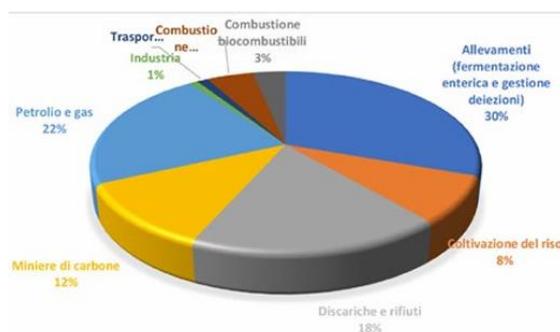


Figura 17: Principali sorgenti delle emissioni globali di CH_4 [16]

Da quanto si evince nel grafico in Figura 18, le emissioni legate ai **processi industriali** rivestono un ruolo ormai trascurabile rispetto alle altre fonti di emissioni nel nostro Paese. Questa importante riduzione è dovuta principalmente al cambio delle tecnologie di produzione avvenuto nel 1986 nell'industria del nerofumo e al calo dei livelli produttivi nell'industria siderurgica.

Le **attività agricole** e le attività legate allo **smaltimento dei rifiuti**, mentre, sono state l'origine della gran parte delle emissioni. Le prime sono state causate principalmente dalle attività legate all'allevamento, e cioè la fermentazione enterica e la gestione degli effluenti che hanno generato rispettivamente il 69,8% e il 21,8% delle emissioni. D'altro canto, le emissioni derivanti dallo smaltimento dei rifiuti sono responsabili dell'origine dell'83,9% delle emissioni dovute alle quantità

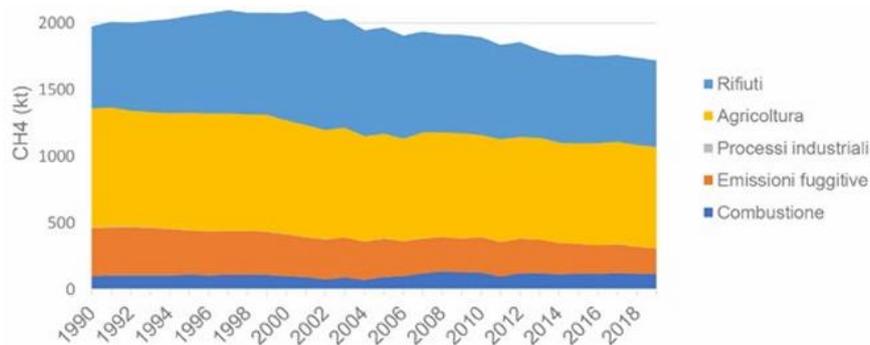


Figura 18: Emissioni di CH_4 per settore in Italia dal 1990-2019. [16]

⁶ Si definiscono **emissioni fuggitive** quelle legate ai rilasci intenzionali o non intenzionali di gas-serra che possono verificarsi durante l'estrazione, la lavorazione e la consegna dei combustibili fossili al punto di utilizzo finale.

crescenti di rifiuti avviate allo smaltimento in discarica controllata. Tuttavia a partire dal 2010 si registra una decrescita delle predette emissioni essenzialmente a causa della diffusione di sistemi per la captazione del biogas e di impianti per il trattamento della frazione organica dei rifiuti.

Le **emissioni fuggitive provenienti dalla filiera del gas naturale** hanno rappresentato il 63% (pari a 154,63 kt) [17] delle emissioni fuggitive totali nel 2019 come vediamo in Tabella 2. Infatti la maggior parte del CH_4 delle emissioni fuggitive del gas naturale è emesso nella distribuzione e nella trasmissione. Le perdite nella distribuzione a livello domestico, da sole, hanno costituito il 79,5% del totale delle emissioni fuggitive.

Tabella 2: Emissioni fuggitive di CH_4 per attività nel 1990 e nel 2019 in kt. [16]

	1990	2019
Distribuzione	248,65	122,98
Trasmissione e stoccaggio	37,56	24,93
Trattamento	13,37	2,02
<i>Flaring</i>	0,94	0,18
Produzione	29,86	4,52
Esplorazione	0,01	0
Totale	330,39	154,63

Le emissioni fuggitive provenienti dal ciclo di vita del gas naturale hanno un impatto non trascurabile sull'**impronta carbonica**⁷, infatti assumendo che il GWP-20 sia pari a 82.5 il peso delle emissioni fuggitive rispetto al totale dell'impronta carbonica può arrivare intorno al 45%, riducendo in maniera evidente i vantaggi ambientali relativi all'uso del gas naturale. [13]

Secondo l'ISPRA, le emissioni fuggitive di metano rappresentano il **20% delle emissioni totali di metano**, ovvero il 5% delle emissioni totali di GHG. In Tabella 3 vediamo la classificazione secondo l'IPCC 2006 delle emissioni fuggitive dai sistemi di gas naturale in funzione della **provenienza** e della **modalità di emissione**.

⁷ La norma ISO 14067 definisce l'**impronta carbonica** (o *carbon footprint*) di un prodotto come la somma delle emissioni e degli assorbimenti di gas-serra, espressa in termini di CO_2 equivalente, valutata sulla base dell'approccio del *life cycle assessment* con riferimento alla categoria di impatto dei cambiamenti climatici. Questo è uno strumento utile per valutare quanto i processi connessi ad un determinato prodotto influenzano il sistema climatico.

Tabella 3: Disaggregazione delle emissioni dalla produzione e dal trasporto del gas naturale[18]

IPCC code	Settore	Spiegazione
1 B 2 b	Gas naturale	Comprende le emissioni da venting, flaring ² e tutte le altre fonti fuggitive associate all'esplorazione, produzione, trattamento, trasmissione, stoccaggio e distribuzione di gas naturale (compreso gas associato e non associato).
1 B 2 b i	Venting ⁸	Emissioni da venting di gas naturale e flussi di gas e vapori di scarico negli impianti di gas.
1 B 2 b ii	Flaring ⁹	Emissioni da flaring di gas naturale e flussi di gas e vapori di scarico negli impianti di gas.
1 B 2 b iii	Tutti gli altri	Emissioni fuggitive negli impianti di gas naturale da perdite di apparecchiature, perdite di stoccaggio, rotture di tubazioni, scoppi di pozzi, migrazione di gas sulla superficie intorno all'esterno dell'involucro della testa del pozzo, curve di sfianto dell'involucro superficiale e qualsiasi altro rilascio di gas o vapore non specificamente considerato come sfianto o flaring.
1 B 2 b iii 1	Esplorazione	Emissioni fuggitive (esclusi venting e flaring) da perforazione di pozzi di gas, test di aste di perforazione e completamenti di pozzi.
1 B 2 b iii 2	Produzione	Emissioni fuggitive (esclusi venting e flaring) dalla testa del pozzo del gas all'ingresso degli impianti di trattamento del gas o, ove il trattamento non sia richiesto, ai punti di raccordo sui sistemi di trasporto del gas. Ciò include le emissioni fuggitive relative alla manutenzione dei pozzi, alla raccolta del gas, al trattamento e alle attività associate di smaltimento delle acque reflue e dei gas acidi.
1 B 2 b iii 3	Trattamento	Emissioni fuggitive (esclusi venting e flaring) dagli impianti di trattamento del gas.
1 B 2 b iii 4	Trasmissione e stoccaggio	Emissioni fuggitive dai sistemi utilizzati per trasportare il gas naturale trattato al mercato (ovvero ai consumatori industriali e ai sistemi di distribuzione del gas naturale). Dovrebbero essere incluse in questa categoria anche le emissioni fuggitive dai sistemi di stoccaggio del gas naturale. Le emissioni degli impianti di estrazione di liquidi di gas naturale sui sistemi di trasporto del gas devono essere comunicate nell'ambito del trattamento del gas naturale (Categoria 1.B.2.b.iii.3). Le emissioni fuggitive legate alla trasmissione di liquidi di gas naturale dovrebbero essere comunicate nella categoria 1.B.2.a.iii.3.
1 B 2 b iii 5	Distribuzione	Emissioni fuggitive (esclusi venting e flaring) dalla distribuzione del gas naturale ai consumatori finali.
1 B 2 b iii 6	Altro	Emissioni fuggitive da sistemi di gas naturale (esclusi venting e flaring) non altrimenti contabilizzate nelle categorie sopra indicate. Ciò può includere emissioni da scoppi di pozzi e rotture di tubazioni o scavi.

In generale è buona norma disaggregare le attività nelle principali categorie e sottocategorie nell'industria del gas e quindi valutare le emissioni separatamente per ciascuna di queste. In seguito, commisurato alla quantità di emissioni e alle risorse disponibili, viene applicato a ciascun segmento il **livello metodologico**. Come afferma l'IPCC 2006, esistono tre livelli metodologici (visibili in Tabella 4) per determinare le emissioni fuggitive dai sistemi di gas naturale.

⁸ Il termine **venting** indica il rilascio diretto del gas in atmosfera che è associato soprattutto con la manutenzione.

⁹ Il termine **flaring** indica la combustione del gas in eccesso estratto insieme al petrolio.

Tabella 4: Livelli metodologici per la stima delle emissioni fuggitive. [18]

Livello	In cosa consiste	Quando si applica
Livello 1	Prevede l'applicazione di appropriati fattori di emissione predefiniti a un parametro di attività rappresentativo (di solito la portata) per ciascun segmento o sottocategoria dell'industria del gas naturale di un Paese.	Dovrebbe essere utilizzato solo per le sorgenti non chiave dell'inventario.
Livello 2	Prevede, come il livello 1, l'applicazione di appropriati fattori di emissione a un parametro di attività rappresentativo per ciascun segmento o sottocategoria dell'industria del gas naturale di un Paese. A differenza del livello 1, però, i fattori di emissione sono specifici per Paese, anziché predefiniti.	Dovrebbe essere applicato alle sorgenti chiave dell'inventario, quando l'uso di un approccio di livello 3 non è praticabile.
Livello 3	Prevede l'applicazione di una rigorosa valutazione bottom-up dal basso verso l'alto per ciascuna tipologia primaria di fonte (ad es. sfiato, flaring, perdite di apparecchiature fuggitive, perdite per evaporazione e rilasci accidentali) a livello di singolo impianto con un'adeguata contabilizzazione dei contributi da fonti minori o temporanee.	Dovrebbe essere utilizzato per le sorgenti chiave dell'inventario, quando i dati sull'attività e sull'infrastruttura necessari sono prontamente disponibili o sono ragionevoli da ottenere.

Le Linee-guida IPCC presentano i **fattori di emissione standard Tier 1** per i diversi settori o lavorazioni, espressi in unità di emissioni in peso per volume unitario di gas.

Vengono forniti **due set di valori dei fattori di emissione**, uno per i **Paesi industrializzati**, corrispondente agli standard di progettazione, gestione e manutenzione dell'America settentrionale e dell'Europa occidentale, e un altro per i **Paesi a economia in via di sviluppo o in transizione**, caratterizzati da quantità molto maggiori di emissioni fuggitive per unità di attività, per effetto di standard di progettazione meno rigorosi, uso di componenti di qualità inferiore, accesso limitato ai mercati del gas naturale e, in alcuni casi, prezzi dell'energia artificialmente bassi con minore incentivo per il risparmio energetico.

Le preoccupazioni per l'approvvigionamento di gas naturale del nostro Paese durante l'invasione russa dell'Ucraina hanno provocato una improvvisa attenzione verso il tema delle emissioni fuggitive di metano dai sistemi di gas naturale. Il metano rilasciato in atmosfera prima di arrivare a destinazione nel nostro Paese, infatti, potrebbe ammontare, secondo le nostre valutazioni, a **3,2-3,9 miliardi di metri cubi**. [16]

Le **emissioni fuggitive** di metano dai sistemi di gas naturale vengono stimate dall'ISPRA utilizzando **metodologie diverse per le diverse attività** (esplorazione, produzione/ trattamento, trasmissione, distribuzione, venting/flaring). I dati di attività consistenti nel numero di pozzi e nella quantità di gas naturale prodotto, trasportato e distribuito, sono ricavati dalle **statistiche ufficiali del settore energetico**, gestite dal Ministero dello Sviluppo Economico e dai dati pubblicati da diversi operatori (SNAM, Edison, Italgas, ENEL).

Le emissioni provenienti dalle diverse attività vengono stimate utilizzando **fattori di emissione forniti dall'IPCC** (esplorazione, produzione/trattamento, venting/flaring), da operatori nazionali come l'ENI (produzione/trattamento, venting/flaring), da altri studi internazionali come quelli realizzati dall'Istituto Battelle per il governo tedesco (distribuzione). Le perdite dalla trasmissione del gas naturale vengono comunicate dagli operatori del settore (SNAM/Italgas/ ENEL) nei propri rapporti ambientali pubblicati con cadenza annuale.

La **qualità delle informazioni** comunicate dagli operatori è fondamentale per l'affidabilità delle stime; in particolare, molto è possibile fare sul segmento della distribuzione che è quello di gran lunga più rilevante in termini di emissioni fuggitive. Oltre alla qualità, è importante tenere in considerazione l'**incertezza di queste stime**, in quanto esistono grandi differenze tra i dati basati su campagne di misurazione, gli studi scientifici e i livelli di emissione dichiarati dagli organismi pubblici ufficiali. Sempre secondo l'ISPRA le principali attività dei settori dell'agricoltura e dei rifiuti, **l'incertezza delle stime di CH₄ si aggira intorno al 20%**, inoltre, per le emissioni fuggitive alcuni dei più grandi eventi di emissione sono il risultato di incidenti e errori di processo imprevedibili e questi potrebbero contribuire a un elevato livello di emissioni dalle operazioni di petrolio e gas. Le differenze dei dati sono dovute anche ai satelliti che possono avere difficoltà nel fornire letture in molte situazioni come operazioni *offshore*, catene montuose, regioni innevate o coperte di ghiaccio e ad alte altitudini. Sono inoltre danneggiati dalla copertura nuvolosa, limitando il numero di giorni in cui è possibile effettuare rilevamenti.

Al di là di queste incertezze, i satelliti stanno fornendo informazioni importanti sulle dimensioni e sulla durata delle grandi perdite in luoghi come il Medio Oriente, il Nord Africa, l'Asia centrale e gli Stati Uniti. Una prima campagna di rilievi ha identificato nel 2019 e nel 2020 più di **1800 eventi "ultra-emettitori"**, che rilasciano spesso diverse tonnellate di metano l'ora [19]. Questi eventi avevano interessato soprattutto l'ex repubblica sovietica del Turkmenistan, la Russia, gli Stati Uniti, l'Iran, il Kazakistan e l'Algeria. Secondo i ricercatori, i grandi rilasci di metano rilevati hanno rappresentato **l'8-12% delle emissioni globali** di metano provenienti dalle infrastrutture del petrolio e del gas durante il periodo preso in considerazione. Alcuni eventi registrati derivavano da incidenti, ma molti erano deliberati. Le società del gas avevano semplicemente scaricato il gas dai gasdotti o da altre apparecchiature prima di eseguire operazioni di riparazione o manutenzione.

Per avere una stima della quantità di metano rilasciata in atmosfera il team formato dalle due organizzazioni Carbon Mapper e Environmental Defense Fund ha eseguito un'analisi sistemica di migliaia di immagini prodotte quotidianamente dalla **missione satellitare Sentinel 5-P** dell'Agenzia spaziale europea (ESA), stabilendo che questa quantità di metano è rilasciata da oltre il 50% delle

strutture per la produzione di gas naturale *onshore*. Si stima che eventi di emissione molto grandi rilevati dal satellite siano stati responsabili di circa **3,5 Mt di emissioni dalle operazioni di petrolio e gas nel 2021 a livello globale**.

Partendo dalla consapevolezza che nessuna politica efficace di riduzione delle emissioni di metano può basarsi su dati inaffidabili, tra febbraio e settembre 2021 l'organizzazione **Clean Air Task Force (CATF)** ha condotto nell'Unione Europea una campagna di rilevazione delle fughe di metano dalle infrastrutture del settore O&G, utilizzando oltre 250 siti localizzati in 11 Stati membri e avvalendosi di una **speciale tecnologia di imaging ottico**¹⁰ del gas che consente di rendere visibile l'inquinamento invisibile da metano. Le emissioni osservate da CATF provenivano principalmente da serbatoi di stoccaggio, camini di soccorso di emergenza, torce spente e varie altre perdite dalle apparecchiature delle tubazioni. [20]

In Italia, tra aprile e agosto 2021, il CAFT ha visitato 46 siti e rilevato emissioni in 35 siti (tra cui pozzi di petrolio e gas, strutture di raccolta, stazioni di lavorazione, stazioni di compressione e strutture per lo stoccaggio del gas). Tra questi siti il CAFT ha osservato, nel terminale GNL di **Panigaglia** della SNAM, un flusso continuo di metano da due sistemi di *venting* di emergenza durante il mese di aprile 2021. Una delle maggiori fonti di emissioni è stata rilevata nei siti di stoccaggio di **Minerbio**, dove è stato documentato un significativo evento di emissioni dal camino di emergenza. Sono state anche osservate molte piccole fonti di emissioni presso l'impianto di stoccaggio del gas di **Cortemaggiore**, dove sono state rilevate almeno nove fonti di emissione di metano. A tal proposito in diverse dichiarazioni e proposte politiche la **SNAM** ha affermato di aver lavorato con successo per molti anni per ridurre le emissioni di metano attraverso programmi volontari, rimanendo fortemente impegnata nel ridurre al minimo le emissioni di metano. La società ha affermato che sta implementando un **programma di rilevamento e riparazione delle perdite** (*Leak Detection and Repair, LDAR*) per i suoi sistemi di trasmissione, lo stoccaggio sotterraneo del gas e il terminale GNL di Panigaglia. Altre società energetiche hanno affermato che **la maggior parte di queste perdite sono inevitabili e necessarie per evitare l'aumento della pressione sugli impianti di stoccaggio**.

In realtà, la situazione documentata dalla campagna della Clean Air Task Force mette in evidenza come il sistema di monitoraggio, reporting e verifica attualmente esistente nell'UE, sostanzialmente

¹⁰ Telecamera a raggi infrarossi (del tipo FLIR GF320), calibrata per visualizzare il metano e altri composti organici volatili. Questo processo è stato raccomandato dall'US-EPA come la migliore tecnologia disponibile per il rilevamento e la riparazione delle perdite nei siti di petrolio e gas nel 2016.

basato sull'auto certificazione e sull'adesione a iniziative volontarie di contenimento delle emissioni, sia **assolutamente inadeguato rispetto alla diffusione del problema delle perdite di gas naturale**. E' quindi evidente che l'introduzione di un sistema vincolante a livello dell'UE per monitorare, comunicare e verificare le emissioni delle aziende di tutto il settore costituisce un passo necessario per affrontare la questione.

Per ovviare a questo problema, con il **Global Methane Pledge**, 111 Paesi - compresa l'UE - si sono impegnati ad uno sforzo collettivo per ridurre **entro il 2030** le emissioni globali di metano di origine antropogenica almeno del **30%** rispetto ai livelli del 2020 per mantenere viva la prospettiva di limitare il riscaldamento globale a non più di 1.5°C. In particolare, come ha annunciato la **Commissione Europea** nel settembre 2020, l'UE ha affiancato questo impegno con quello relativo ad una riduzione delle emissioni complessive del 55% al 2030 rispetto 1990.

La strategia messa in atto dall'UE prevede come **obiettivo intermedio al 2030** la necessità di ridurre le emissioni di metano tra il 35% e il 37% rispetto al 2005, al fine di rispettare l'impegno ad una riduzione delle emissioni complessive del 55% al 2030 rispetto al 1990 e della neutralità climatica entro il 2050. Del resto questa strategia non definisce obblighi specifici per gli Stati membri, al contrario **individua alcuni indirizzi per il monitoraggio ambientale**, la revisione della normativa, la promozione delle buone pratiche e la ricerca, per i settori dell'energia, dell'agricoltura, della gestione dei rifiuti e delle acque reflue e per le azioni trasversali.

Tra il 2000 e il 2019, l'Italia è risultata addirittura **4^a a livello UE per la riduzione delle emissioni di CO₂, ma solo 18^a per la riduzione di quelle di CH₄**. Questo significa che la trasformazione energetica in corso non è sufficiente a ridurre in modo significativo le emissioni di CH₄, e sono necessarie misure mirate nei settori dei rifiuti e dell'agricoltura e nel settore energetico per le emissioni fuggitive. Questo è quanto si evince dall'analisi e dalla quantificazione di quanto già previsto nel Piano nazionale integrato per l'energia e il clima. Quindi nel nostro Paese la riduzione delle emissioni di metano è stata decisamente inferiore a quella di altri Stati membri. [21]

Dalle percentuali in Figura 19 possiamo affermare che i **processi di combustione** che sono responsabili del 7.5% delle emissioni di metano a livello nazionale sono all'origine delle emissioni dal settore energetico, dai consumi energetici del settore industriale, dai settori civile e residenziale e dai trasporti. Queste emissioni di metano dai processi di combustione sono destinate a scendere, anche se attualmente l'Italia non dispone di documenti programmatici in linea con gli obiettivi di decarbonizzazione individuati dall'UE, come effetto della decarbonizzazione dell'economia, ottenuta

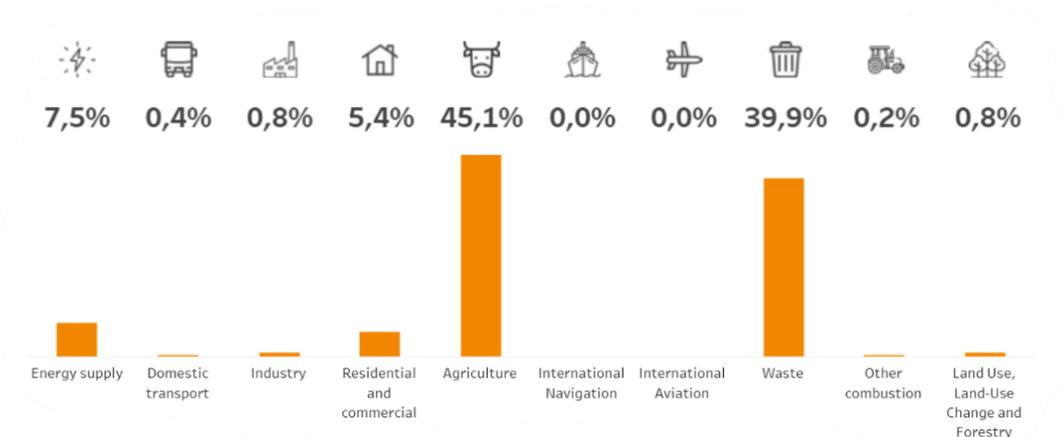


Figura 19: Percentuale del totale delle emissioni di metano nel 2022. [19]

grazie alla crescita delle fonti rinnovabili nella produzione elettrica, al progressivo abbandono dei prodotti petroliferi nei trasporti, all'aumento di efficienza e all'elettificazione in ambito sia industriale che civile (con la progressiva riqualificazione degli edifici e la diffusione delle pompe di calore).

Per quanto riguarda le **emissioni fuggitive**, oltre all'andamento già descritto dei consumi dei combustibili fossili, si è tenuto conto per i prodotti petroliferi e per il gas naturale anche dei seguenti obiettivi di riduzione delle emissioni:

- **Flaring di routine** vietato entro il 2025 (come previsto dall'art. 15 della proposta di regolamento COM(2021) 805 final sulla riduzione delle emissioni di metano nel settore dell'energia);
- Entro il 2025 riduzione del 55% rispetto ai livelli del 2015 per le **emissioni di metano dovute al trasporto del gas naturale**;
- Entro il 2030 riduzione del 47% rispetto ai livelli del 2015 per le **emissioni di metano dovute al trasporto del gas naturale**;

Per quanto riguarda i **processi industriali**, che rivestono ormai un ruolo trascurabile nell'inventario nazionale delle emissioni di metano (0,097% del totale), non si è considerata alcuna ulteriore riduzione per quanto riguarda le emissioni dalla produzione del nerofumo, dell'etilene, del propilene e dello stirene, mentre le emissioni dall'industria siderurgica sono state ridotte in linea con il calo delle produzioni ipotizzato nella Strategia di lungo termine [22].

Negli ultimi dieci anni l'andamento delle emissioni dal **settore dell'agricoltura** è rimasto relativamente stabile, tra le misure che si possono adottare per influenzare l'andamento delle emissioni di metano nell'agricoltura, si possono citare l'adozione di strategie di alimentazione del bestiame che permettono una riduzione delle emissioni legate alla fermentazione enterica, l'adozione di sistemi di stabulazione e di tecniche di stoccaggio e di spandimento del letame che comportano una riduzione delle emissioni dalla gestione delle deiezioni e permettono la produzione dei biogas. Queste soluzioni, se adottate, ridurrebbero le emissioni di metano dal settore dell'agricoltura, confrontate con i livelli al 2019, del 5,7% al 2030, e tra il 15,6% e il 20,0% al 2050. [22]

La **gestione sostenibile dei rifiuti e di trattamento delle acque reflue civili ed industriali** influiscono in maniera diretta (circa il 40%) sulle emissioni di metano sono correlate sostanzialmente alla frazione organica dei rifiuti e alla captazione del biogas dagli impianti di trattamento dei reflui.

Tenendo conto degli andamenti settoriali descritti, le **emissioni complessive di CH₄ in Italia** si riducono del 17.0% entro il 2030 e tra il 39.2% e il 42.5% entro il 2050. Queste percentuali non sono solo insufficienti rispetto agli obiettivi di neutralità climatica entro il 2050, ma rimangono molto distanti rispetto agli obiettivi intermedi entro il 2030 individuati dalla *Strategia europea sul metano* e dal *Global Methane Pledge*. Infatti la riduzione percentuale delle emissioni complessive al 2030 si ferma al 26% rispetto al 2005, a fronte del 35-37% indicato dalla Strategia europea sul metano, e al 13,7% rispetto al 2020, a fronte del 30% identificato dal Global Methane Pledge come obiettivo da raggiungere attraverso uno sforzo collettivo.

Più rilevante è invece il **ruolo delle emissioni fuggitive** che saranno interessate dal complesso degli interventi che saranno introdotti dalla proposta di regolamento europeo sulla riduzione delle emissioni di metano nel settore dell'energia. Questi interventi, insieme agli impegni volontari assunti dalle aziende italiane della filiera del gas naturale, sono sufficienti per ridurre le emissioni fuggitive al 2030 del 52,4% rispetto al valore del 2019, e dal 12,9% al 7,4% il loro peso rispetto al totale nazionale. Un ulteriore dimezzamento delle emissioni potrebbe essere conseguito all'orizzonte 2050 per effetto delle **modifiche nel mix dei consumi primari di fonti energetiche** previste nel passaggio dallo scenario PNIEC per il 2030 agli scenari di decarbonizzazione al 2050.

Al di là del 2030, ulteriori interventi per la riduzione delle perdite dalle reti di trasporto e di distribuzione non trovano invece giustificazione dal punto di vista economico. Rapporti recenti pubblicati dai regolatori europei mettono in evidenza **che un declino della domanda di gas si tradurrà in una analoga riduzione dell'utilizzo delle infrastrutture stesse**, con il rischio di avere

dei c.d. “*stranded asset*”, ovvero infrastrutture finanziate dal sistema che saranno sfruttate per un tempo non sufficiente a ripagarne l’investimento. [23]

Ciò significa che questi progetti dovrebbero avere come **prospettiva un utilizzo delle reti o una loro riconversione verso l’utilizzo di gas rinnovabili**, come l’idrogeno o il biometano, o la realizzazione di sistemi Power to Gas. [24]

La riduzione delle emissioni di metano prevista dagli operatori italiani della filiera del gas naturale è affidata ad una serie di buone pratiche, molte delle quali sono già patrimonio delle aziende italiane, e la cui attuazione dovrebbe solo essere verificata da un adeguato sistema di monitoraggio, mentre altre saranno sviluppate in relazione all’evoluzione del quadro normativo europeo, in particolare attraverso l’approvazione della proposta di regolamento sulle emissioni di metano di origine energetica. [22]

2.3 Calcolo delle emissioni

La quantificazione delle emissioni di metano dalle reti di distribuzione del gas naturale è essenziale per valutare l’impatto ambientale e per implementare misure di mitigazione efficaci. Questo capitolo illustra le formule utilizzate per calcolare le emissioni di metano, fornendo una base solida per la parte sperimentale, in cui verranno stimate le emissioni provenienti dalle reti di distribuzione italiana in media e bassa pressione.

Il progetto MEEM (Methane Emission Estimation Method) [25] ha sviluppato un metodo accurato e coerente per la stima delle emissioni di metano dalla rete di distribuzione del gas, considerando l’incertezza elevata delle stime attuali e la necessità di maggiore trasparenza e credibilità dei risultati.

La formula in questione, utilizzata per il calcolo delle emissioni fuggitive derivanti dalla linea di distribuzione è la seguente:

$$E_{CH_4} = q_v \times t \times n \times x_{CH_4} \quad (1)$$

Dove,

E_{CH_4} sono le emissioni di metano delle perdite rilevate dalle indagini $\left[\frac{m^3}{anno} \right]$

q_v è il tasso medio di emissione di una perdita $\left[\frac{m^3}{perdita \cdot h} \right]$

t è la durata media della fuga di gas di una perdita [h]

n è il numero di perdite rilevate all'anno $\left[\frac{\text{perdite}}{\text{anno}} \right]$ o $\left[\frac{\text{perdite}}{\text{Km} \cdot \text{anno}} \right]$
 x_{CH_4} è il contenuto di metano del gas naturale in percentuale

È importante determinare se il flusso di gas dalla perdita è supersonico o subsonico, in quanto a seconda di questo si avrà una formula diversa per il calcolo del tasso medio di emissione di una perdita (q_v). Per questa valutazione viene utilizzato il rapporto di pressione critica, definito come segue:

$$\left(\frac{p_{atm}}{p_{abs}} \right)_{crit} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \cong 0,54 \text{ per il gas naturale}$$

Dove,

p_{atm} è la pressione atmosferica [Pa]
 p_{abs} è la pressione assoluta della condotta, definita come $p_{int} + p_{atm}$ [Pa]
 k è l'indice adiabatico, che per il gas naturale è $\cong 1,3$

Se il rapporto di pressione $\frac{p_{atm}}{p_{abs}}$ è uguale o maggiore del rapporto di pressione critica il flusso è subsonico, se è minore il flusso è supersonico:

$$\frac{p_{atm}}{p_{abs}} \geq \left(\frac{p_{atm}}{p_{abs}} \right)_{crit} \rightarrow \text{Flusso subsonico} \quad (2)$$

$$\frac{p_{atm}}{p_{abs}} < \left(\frac{p_{atm}}{p_{abs}} \right)_{crit} \rightarrow \text{Flusso supersonico} \quad (3)$$

Una volta determinato il valore del rapporto e quindi il tipo di flusso che si genera dalla perdita, andiamo a calcolare il tasso medio di emissione di una perdita (q_v) attraverso una delle seguenti formule (a seconda che siamo nelle condizioni di flusso subsonico o supersonico) :

$$\text{Flusso subsonico} \Rightarrow q_v = 3600 \cdot \frac{C_D}{\rho(T,p)} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_h^2 \cdot \left(\frac{p_{atm}}{p_{abs}} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot p_{abs} \cdot \rho_{int} \cdot \left(1 - \left(\frac{p_{atm}}{p_{abs}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (4)$$

Oppure

$$\text{Flusso supersonico} \Rightarrow q_v = 3600 \cdot \frac{C_D}{\rho(T,p)} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_h^2 \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot p_{int} \cdot \rho_{int}} \quad (5)$$

Dove,

C_D è il coefficiente di scarico, pari a circa 0,6 per il gas naturale
 $\rho(T,p)$ è la densità del gas naturale alle condizione di riferimento $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$

d_h è il diametro idraulico della perdita [m]

ρ_{int} è la densità del gas all'interno della condotta $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

La densità del gas naturale alle condizioni di riferimento $\rho(T, p)$ è stata calcolata usando la seguente formula:

$$\rho(T, p) = \frac{M_m}{V_m} = 0,66 \frac{Kg}{m^3} \quad (6)$$

Si specifica che la massa molare (M_m) utilizzata è $16,049 \times 10^{-3} \frac{Kg}{mol}$, mentre per il calcolo del volume molare (V_m) è stata utilizzata l'equazione empirica di *Van der Waals* per i gas reali utilizzando i parametri trovati in letteratura per i vari coefficienti dell'equazione, e la normativa EN ISO 13443:2005 per la pressione e temperatura da considerare all'interno dell'equazione. Ovviamente essendo un'equazione di 3° grado ci sono state tre soluzioni, delle quali solo una si è rilevata possibile in quanto di segno positivo ($V_m = 0,0234 \frac{m^3}{mol}$).

Il diametro idraulico (d_h) è dato dalla seguente formula:

$$d_h = \frac{4A}{P}, \text{ con } A \text{ area della perdita e } P \text{ perimetro della stessa.} \quad (7)$$

In questo studio per semplificare il calcolo è stato ipotizzato che tutte le perdite siano di forma circolare e con un diametro di 0,4mm.

La densità interna del gas (ρ_{int}) è calcolata tramite la formula consigliata dal documento preso come riferimento [25]:

$$\rho_{int} = \frac{p_{int}}{R_i \cdot T_{int}}, \text{ con } R_i \text{ costante naturale dei gas reali} \quad (8)$$

Come possiamo notare la densità intera del gas è direttamente proporzionale con la pressione interna della condotta e pertanto sarà ricalcolata sia nelle condotte di media e sia nelle condotte di bassa pressione. La T_{int} considerata è quella fornita dalla normativa EN ISO 13443:2005.

3. Efficacia della Tecnologia GOLEM nella Riduzione delle Emissioni di Metano

La necessità di ridurre le emissioni di metano è critica, considerando che il metano è un potente gas serra con un impatto significativo sul riscaldamento globale. In Italia, le emissioni di metano provengono in gran parte dai settori energetico, agricolo e della gestione dei rifiuti, con un contributo rilevante anche dalle emissioni fuggitive dalle infrastrutture di distribuzione del gas naturale.

AUTOMA è una società di progettazione, ingegnerizzazione e produzione di tecnologie Made in Italy per il monitoraggio remoto in ambito Oil, Gas e Water, e per la Building Automation in ambito civile. L'azienda, fondata in Italia nel 1987 grazie all'attuale CEO Giorgio Giorgetti, si è evoluta parallelamente allo sviluppo delle tecnologie elettroniche, accumulando una grande esperienza nel settore dell'elettronica e dell'innovazione. AUTOMA vanta vari riconoscimenti internazionali, inclusi 3 brevetti e 11 certificazioni ATEX, e ha oltre 40.000 dispositivi installati in oltre 30 paesi. Attualmente, l'azienda conta circa 70 dipendenti, di cui il 40% coinvolti in progetti di Ricerca e Sviluppo, ai quali AUTOMA destina una media del 10% del fatturato annuale.

I continui investimenti in innovazione tecnologica e la costante introduzione di miglioramenti, frutto della condivisione delle best practice e delle esperienze operative acquisite, hanno reso AUTOMA, con il brand GOLIAH, un punto di riferimento per le soluzioni relative al monitoraggio remoto della protezione catodica e dei parametri operativi delle reti di distribuzione e trasporto di petrolio, acqua e gas. Gli stessi principi guidano inoltre le attività in ambito civile, dove AUTOMA opera con il brand commerciale XEFIRO e sviluppa soluzioni per la Building Automation volte a ridurre i consumi energetici, migliorare il livello di comfort e sicurezza degli ambienti e permettere l'integrazione tra differenti tecnologie.

AUTOMA ha oltre 30 anni di esperienza nello sviluppo di soluzioni complete e affidabili per il monitoraggio intelligente delle reti di distribuzione e trasporto di petrolio, gas e acqua. La piattaforma GOLIAH® rappresenta l'integrazione delle migliori tecnologie per il monitoraggio remoto della protezione catodica, delle pressioni e degli odorizzanti, e include la GOLIAH ACADEMY® per la formazione continua dei clienti. Una componente chiave di GOLIAH® è il software di gestione SCADA, un'applicazione web e mobile oriented per la raccolta e l'analisi evoluta dei dati dai dispositivi installati sul campo.

Tra i dispositivi offerti nella suite pressioni di GOLIAH, troviamo GOLIAH2P, che funziona in modalità RTU, interrogato periodicamente da SCADA su protocollo MODBUS e principalmente installato nelle cabine RE.MI e nei GRF. Inoltre, GOLIAH4P-ZERO invia i dati in maniera spontanea da remoto (modalità data-logger) ed è dotato di certificazione ATEX per installazione in zona 0. Due dei sistemi brevettati da AUTOMA sono particolarmente rilevanti: GOLEM, un servomeccanismo ad accoppiamento meccanico che permette il controllo remoto delle valvole di regolazione e SPECTRA un dispositivo per la misura della concentrazione dell'odorizzante in linea nel gas naturale (TBT e THT).

L'obiettivo di questo capitolo è fornire una stima precisa delle emissioni di metano nei sistemi di distribuzione a media e bassa pressione in Italia e valutare l'impatto della tecnologia GOLEM sulla riduzione di queste emissioni. Utilizzando dati provenienti dal rapporto ARERA del 2023 [26], si analizzeranno le emissioni fuggitive attuali e si stimeranno le riduzioni percentuali di metano ottenibili con l'implementazione della tecnologia GOLEM sulle cabine RE.MI e i GRF presenti sul territorio italiano.

Ridurre le emissioni di metano non è solo una questione ambientale, ma ha anche importanti implicazioni per la salute pubblica. Il metano contribuisce alla formazione di ozono troposferico, un inquinante che ha effetti diretti sulla salute umana, come infiammazioni polmonari, peggioramento dell'asma e riduzione della funzione polmonare. La riduzione delle emissioni di metano attraverso l'uso della tecnologia GOLEM può quindi portare a miglioramenti significativi nella qualità dell'aria, con benefici per la salute respiratoria e cardiovascolare della popolazione.

In sintesi, questo capitolo si propone di dimostrare come l'adozione della tecnologia GOLEM possa non solo contribuire alla mitigazione del cambiamento climatico, ma anche migliorare la qualità della vita riducendo i rischi per la salute associati all'inquinamento atmosferico.

3.1 II GOLEM

GOLEM è tecnologia brevettata per il **controllo delle stazioni di regolazione della pressione** nelle reti di distribuzione e trasporto del gas naturale.

Rende qualsiasi regolatore controllabile a distanza, rendendo la **regolazione della pressione automatica e dinamica**.

La tecnologia GOLEM si basa su un **servomeccanismo ad accoppiamento meccanico** che si occupa della vite di regolazione del regolatore e lo rende controllabile.

L'innovativa tecnologia di adattamento lo rende adatto a interventi di retrofit, sia per i regolatori di pressione pilotati che per quelli ad azione diretta. Il sistema è completato da meccanismi di sicurezza meccanici intrinseci e dalla possibilità di azioni manuali.

Rappresenta una soluzione **efficace** per i seguenti motivi:

- È **compatibile con qualsiasi regolatore**;
- La **regolazione della pressione** può essere impostata sia **localmente** che da **remoto**: singolo comando, programmazione oraria, comando SCADA remoto. Il GOLEM opera per garantire una certa pressione sul punto di consegna della rete;
- Permette una regolazione del flusso basata sulla **limitazione di portata**, in modo da garantire una portata massima consentita per determinati clienti, oppure una **portata costante** come nelle stazioni di iniezioni del biometano;
- Grazie al sistema di regolazione dinamica, realizzato tramite la combinazione del monitoraggio remoto dei punti di erogazione e un motore AI, la pressione complessiva è sempre la più bassa possibile (nessuna sovrappressione), con una conseguente **riduzione delle emissioni di metano**;
- Permette **maggiore sicurezza** in quanto consente un intervento rapido e immediato sui regolatori in presenza di condizione anomala, senza interventi sul campo. Inoltre, è possibile un'interruzione della fornitura quasi al 100%;
- Consente una **digitalizzazione della rete** grazie al monitoraggio remoto e al motore di IA, ottenendo in questo modo dati digitalizzati.

Inoltre, rappresenta una soluzione **integrata** per maggiore efficienza in quanto:

- Presenta un **design compatto** che ha un impatto minimo sulle stazioni esistenti e può essere installato anche in spazi ristretti. È progettato per un'installazione facile e veloce ed è dotato di una RTU G2P che consente di monitorare la pressione in ingresso e in uscita e la portata. Inoltre, gestisce tutte le comunicazioni verso il **software WebPressure**, o qualsiasi altro sistema SCADA esistente, attraverso i più comuni protocolli di comunicazione;
- **Ottimizza gli interventi di manutenzione sul campo** dato che è capace di trasmettere i parametri diagnostici (stato della comunicazione, livello di alimentazione, guasti, ecc.) ed è possibile effettuare l'aggiornamento del firmware sia localmente che da remoto;
- È collegato a **WebPressure** che è una piattaforma per la gestione dei dati raccolti dai dispositivi di monitoraggio e controllo della pressione: gestione degli allarmi, sinottici, analisi, monitoraggio in tempo reale, trend temporali, rappresentazione grafica, configurazione dei dispositivi, motore di IA per la regolazione dinamica;

- Le attività svolte dall'operatore in campo, sia in termini di prima configurazione dei dispositivi che di installazione/manutenzione degli stessi, sono gestite in campo con il software client **Fido** per sistema operativo Windows tramite comunicazione wireless locale in MiWi.

La tecnologia GOLEM (Figura 20) è un insieme funzionale di dispositivi la cui applicazione è stata studiata per poter essere utilizzata su qualsiasi **sistema di regolazione (GRF) senza interventi di modifica e/o adeguamento**. L'elemento innovativo è costituito appunto dal sistema di adattamento della tecnologia regolante ai dispositivi manuali di regolazione, sia per GRF pilotati che per GRF ad azione diretta.

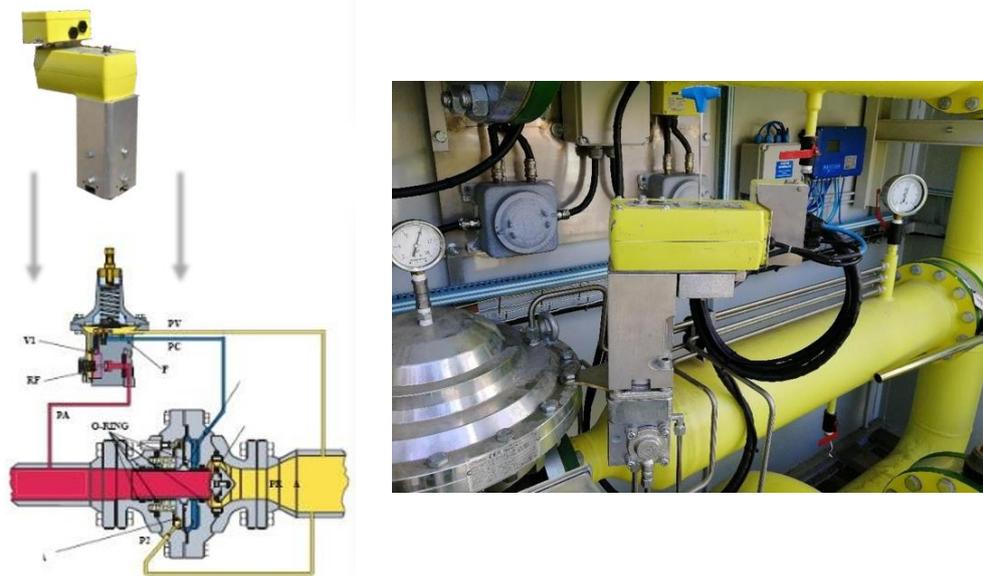


Figura 20: A sinistra schema tecnico del GOLEM, a destra è mostrato la fotografia di un GOLEM in un GRF. [11]

Il dispositivo principale è controllabile mediante un'unità remota della famiglia **GOLIAH 2P** (come vediamo in Figura 21), e quindi totalmente controllabile da remoto ed azionato in base alle caratteristiche operative mutue configurate sull'unità remota di controllo che ne gestisce gli algoritmi operativi.

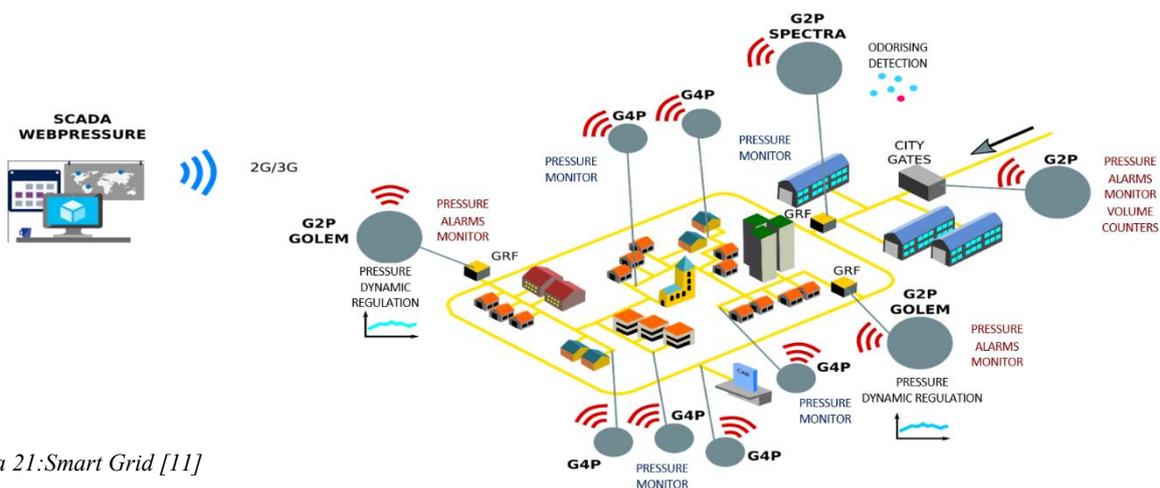


Figura 21: Smart Grid [11]

Il suo **ambito di applicazione** caratteristico è il controllo remoto dei GRF, la loro tele-regolazione e la regolazione dinamica del punto di consegna in funzione di profili operativi stabiliti dal gestore e funzionali al miglior funzionamento della rete di distribuzione, alla massimizzazione dell'efficienza del servizio, al miglioramento della sicurezza ed alla minimizzazione delle perdite.

Le principali funzionalità del GOLEM sono:

- Regolazione automatica della **pressione di uscita** del GRF in funzione di un punto di consegna assegnato;
- Regolazione automatica della **massima portata volumetrica di uscita** del GRF in funzione di un limite assegnato;
- Regolazione dinamica della pressione di uscita del GRF **in funzione di una tabella oraria e settimanale** di profili di pressione identificanti punti di consegna assegnati;
- Regolazione dinamica della massima portata volumetrica di uscita del GRF in funzione di una tabella oraria e settimanale di profili di flusso identificanti limiti assegnati;
- Regolazione dinamica della pressione di uscita in funzione del mantenimento nei limiti di pressione stabiliti dei punti di rete monitorati ed identificati come critici e/o caratteristici (norma **UNI 11631**);
- Regolazione dinamica di pressione/flusso dei punti interagenti su rete magliata per **l'ottimizzazione del bilanciamento** di intervento dei singoli GRF sul tratto comune;
- Inversione delle linee di regolazione nei GRF a doppia linea;
- Chiusura di sicurezza dei GRF in caso di allarme fuga.

Come già detto, il GOLEM opera sotto il controllo di un'unità remota di monitoraggio e regolazione del tipo **G2P**. Grazie all'intelligenza dell'unità remota assolve a tutte le funzioni operative sopra elencate e gestisce in perfetta autonomia le sicurezze tecniche previste per garantire la funzionalità assoluta del sistema di regolazione e l'impedimento di stati operativi indesiderati. Le sicurezze generali sono tutte elettromeccaniche ed indipendenti dal sistema intelligente di gestione al fine di garantire una totale ridondanza del sistema. Il servomeccanismo di controllo opera sulla vite di regolazione del pilota o del regolatore primari nel caso di regolazione ad azione diretta, e variandone la posizione garantisce le funzionalità previste. Il dispositivo prevede 3 tipi di **modalità operative**:

1. **Automatica**: quando regolata dai punti di consegna stabiliti e dalle tabelle di profilazione oraria;
2. **Semi-automatica**: quando gestita mediante comando remoto incaricato dall'operatore di tele-controllo;

3. **Manuale:** quando gestita localmente dall'operatore in campo.

L'applicazione del sistema ha **tre obiettivi primari:**

1. L'incremento del livello di sicurezza che, grazie alla remotizzazione del sistema permette l'intervento sulle funzioni del GRF senza l'ausilio di operatori in campo, con immediatezza di azione ed in ambiente assolutamente sicuro.

I benefici **diretti** derivanti dall'incremento del livello di sicurezza nella gestione del GRF sono:

- Immediatezza di azione;
- Possibilità concreta d'interruzione dell'erogazione;
- Riduzione dei costi di movimento del personale.

Mentre i benefici **indiretti** sono:

- Riduzione dei costi indiretti derivanti dalle operazioni in campo;
- Riduzione delle pressioni massime utili con diminuzione delle fughe e riduzione di falsi allarmi.

2. L'ottimizzazione dei risparmi che sono il conseguimento di un risparmio attivo sul prodotto e sui costi diretti ed indiretti di intervento in campo.

I benefici **diretti** che comporta il risparmio di costi non pianificati sono:

- Riduzione del volume delle fughe con conseguente riduzione di costi dovuti a prodotto disperso non fatturabile all'utenza;
- Riduzione dei costi di movimento del personale in intervento ordinario (trasferimenti, indennità, mezzi e consumo);
- Riduzione dei costi di movimento del personale in intervento straordinario e/o di emergenza (trasferimenti, indennità, mezzi e consumo).

Diversamente, i benefici **indiretti** sono:

- Riduzione del volume delle fughe con conseguente riduzione di costi dovuti alla segnalazione di allarmi fuga;
- Riduzione dei costi indiretti derivanti dalla occasionalità di incidenti provocati naturalmente dal dislocamento in campo del personale in intervento ordinario;
- Riduzione dei costi indiretti derivanti dalla occasionalità di incidenti provocati naturalmente dal dislocamento in campo del personale in intervento straordinario.

3. Il **controllo remoto completo**, cioè, una totale e completa gestione remota della rete che permette oltre azioni ad azioni di regolazione puntuale o pianificata mediante profili di consumo, una completa regolazione dinamica della rete con conseguente incremento dell'efficienza del servizio (riferimento norma **UNI 11631**) e ribilanciamento dello stress operativo sui differenti GRF impegnati nella rete.

I benefici **diretti** derivanti dal controllo remoto sono:

- Incremento del livello di efficienza e qualità del servizio (riferimento norma **UNI 11631**);
- Bilanciamento dinamico della rete;
- Auto-adattabilità del sistema alla variazione di domanda;
- Profilazione dinamica della rete.

Anche quelli **indiretti** sono molteplici:

- Ridistribuzione del carico di lavoro dei GRF;
- Allungamento del tempo vita e delle operazioni di manutenzione pianificata;
- Riduzione degli interventi di manutenzione correttiva;
- Gestione automatica delle azioni di inversione e ribilanciamento stagionali.

Quando parliamo di sistema **GOLEM** per le stazioni di regolazione (Figura 23), ci riferiamo all'insieme formato da:

- **GOLIAH2P**: apparato per il controllo remoto nelle reti di distribuzione e trasporto di gas, petrolio e acqua. Tale strumento è progettato per la misurazione, il monitoraggio e il controllo remoto delle pressioni nelle tubazioni, nei gruppi di riduzione finale e nelle cabine RE.MI. certificato **ATEX II 2G Ex ib IIB T3 Gb** e può essere installato direttamente nelle cabine di regolazione. Il terminale implementa inoltre l'algoritmo per la **CORREZIONE di VOLUME PTZ SGERG88 o AGA8**;
- **MOTORE**: servomeccanismo di controllo che opera sulla vite di regolazione del pilota e, variandone la posizione, garantisce le funzionalità previste. Questo motore è dotato delle seguenti caratteristiche tecniche:
 - Certificazione di protezione **ATEX (Zone 1, 2, 21 y 22) II 2 G/D EEx d ia IIC T6 o T5G**;
 - Certificazione CE di tipo PTB 04 ATEX 1028 X;
 - 4 velocità di corsa regalabili (60~480 sec. /360°);
 - IP66 T80 °C o T95 °C;

Il posizionamento del motore sopra il pilota è possibile grazie alla presenza di un blocco di adattamento specifico visibile in Figura 22:

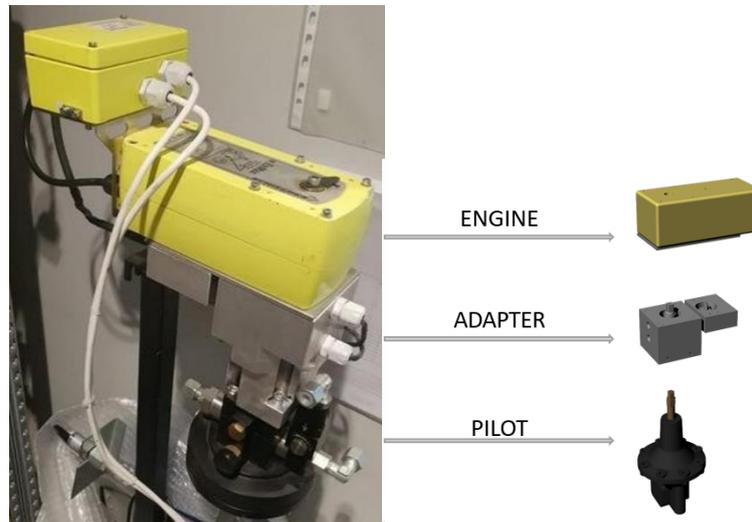


Figura 22: Adattatore del motore per il pilota [11]

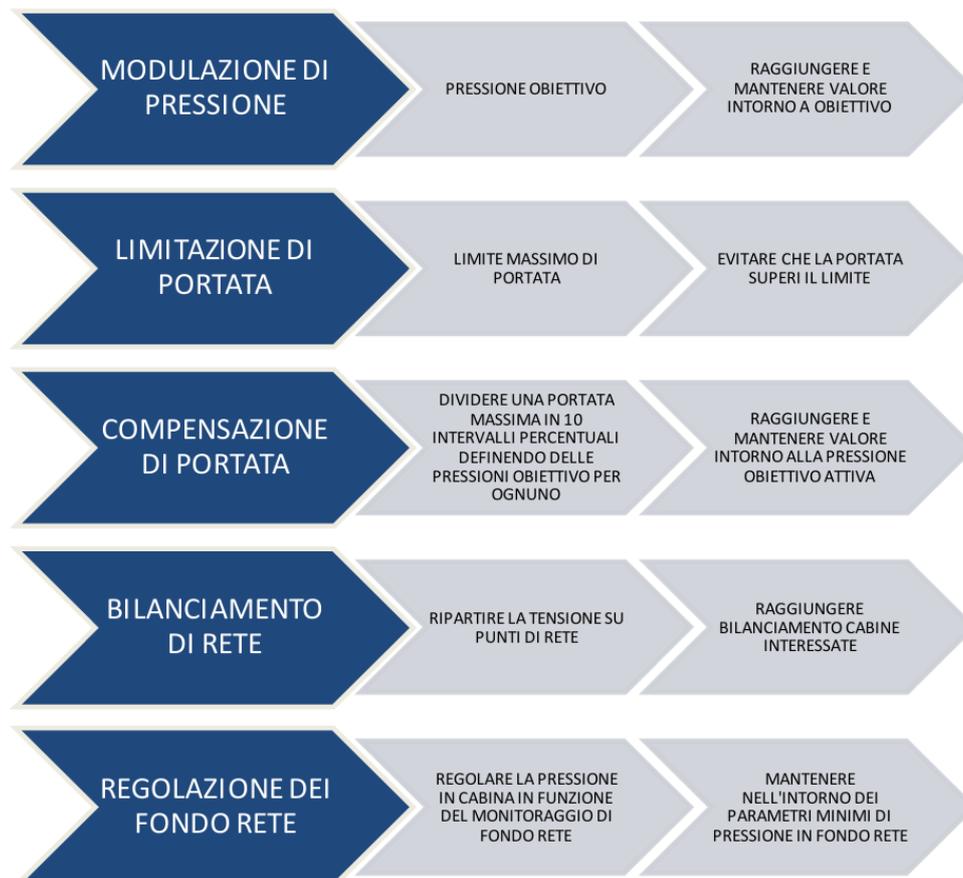
- **CONTROLLI/CONNESSIONI:** collegamenti e sicurezze generali, integralmente elettromeccaniche ed indipendenti dal sistema intelligente di gestione, al fine di garantire una totale ridondanza del sistema ed impedire attivazioni indesiderate e non controllate del motore;
- **HARDWARE E SOFTWARE:** componenti che apportano intelligenza al sistema.



Figura 23: Componenti del GOLEM: 1. GOLIAH2P; 2. Motore ; 3. Controlli e connessioni [11]

Il sistema GOLEM ha la finalità di mantenere costante, nell'intorno del **valore obiettivo**, la pressione in un punto di regolazione di rete, evitando allo stesso tempo che la portata superi un valore limite configurato.

Le **modalità operative** sono le seguenti.



(Tutte le definizioni dei termini tecnici utilizzati sono riportati nell'**APPENDICE 1**).

La **regolazione generale** non richiede azioni manuali da parte di un operatore in campo, infatti, nella sua totalità, è gestibile in maniera remota per mezzo del sistema SCADA. Il GOLEM, una volta configurato, realizza automaticamente due compiti:

- **LIMITAZIONE DI PORTATA:** il cui obiettivo è evitare che il **valore di portata** superi il **limite massimo di portata** come preimpostato dall'operatore in fase di configurazione e che non può cambiare automaticamente;
- **MODULAZIONE DI PRESSIONE:** che il doppio obiettivo di determinare, secondo opportuni criteri, il valore della **pressione obiettivo** più adeguato e di mantenere la **pressione misurata** nell'intorno di questo valore.

I **criteri** per la determinazione della **pressione obiettivo** sono:

1. **MODULAZIONE REMOTA**: il valore della pressione obiettivo viene configurato e non può cambiare automaticamente;
2. **MODULAZIONE secondo un PROFILO SETTIMANALE**: il valore della pressione obiettivo varia in funzione di una programmazione operativa settimanale divisa per fasce orarie;
3. **MODULAZIONE per COMPENSAZIONE DI PRESSIONE**: il valore della pressione obiettivo varia in funzione del **valore di portata** definito in un profilo di intervalli percentuali.

Il **flusso operativo** del GOLEM avanza ad ogni **ciclo di misura**: ogni volta che un nuovo gruppo di misure è a disposizione, viene analizzato per decidere se esistono le condizioni per una transizione di stato. In generale, sia in **limitazione di portata** che in **modulazione di pressione**, il procedimento si divide in due fasi:

- **FASE ATTIVA (REGOLAZIONE)**: durante la quale il GOLEM, che non ha ancora raggiunto il valore obiettivo, cerca di regolarsi di conseguenza, controllando la rete con azioni di aumento/riduzione della compressione e analizzando i risultati per generare ulteriori azioni;
- **FASE PASSIVA (ATTESA)**: durante la quale il GOLEM, che ha raggiunto il valore obiettivo, aspetta che si rilevino cambi nelle condizioni della rete o dei parametri di configurazione che possano generare una nuova FASE ATTIVA.

Al fine di comprendere meglio il funzionamento del GOLEM definiamo i seguenti **stati**:

- **LIMITAZIONE DI PORTATA**: sistema in modalità limitazione di portata;
- **MODULAZIONE DI PRESSIONE**: sistema in modalità modulazione di pressione;
- **ARRESTO TEMPORANEO**: sistema in **modalità di sospensione**. Tutte le attività rimangono in attesa per un intervallo temporale definito;
- **OFF**: sistema in modalità **arresto definitivo**. Il GOLEM rimane disattivato fino ad una sua riattivazione manuale.

Preme evidenziare che quando il sistema si trova nello stato di **OFF**, può essere riattivato con un'attivazione manuale (locale o remota) ma, ad ogni modo, prima che il GOLEM si attivi, il sistema verifica se i parametri di configurazione sono coerenti, in quanto se non ci sono le condizioni necessarie, ogni tentativo di messa in servizio del GOLEM termina in pochi secondi.

Il GOLEM si attiva quando una **limitazione di portata**, una **modulazione di pressione** o un insieme delle due viene attivata; la **limitazione di portata ha priorità sulla modulazione di pressione**. Se viene attivata la limitazione di portata viene deciso per prima cosa se è necessario iniziare/continuare una limitazione. Sia nel caso in cui venga attivata la limitazione di portata che nel caso in cui venga attivata la modulazione di pressione, sebbene con metodologie differenti, viene deciso se è necessaria una regolazione (REGOLAZIONE NECESSARIA?); in caso affermativo si determina il modo di realizzarla (DETERMINARE AZIONE). Per una migliore comprensione di seguito è riportato il **diagramma del flusso operativo** (Figura 24):

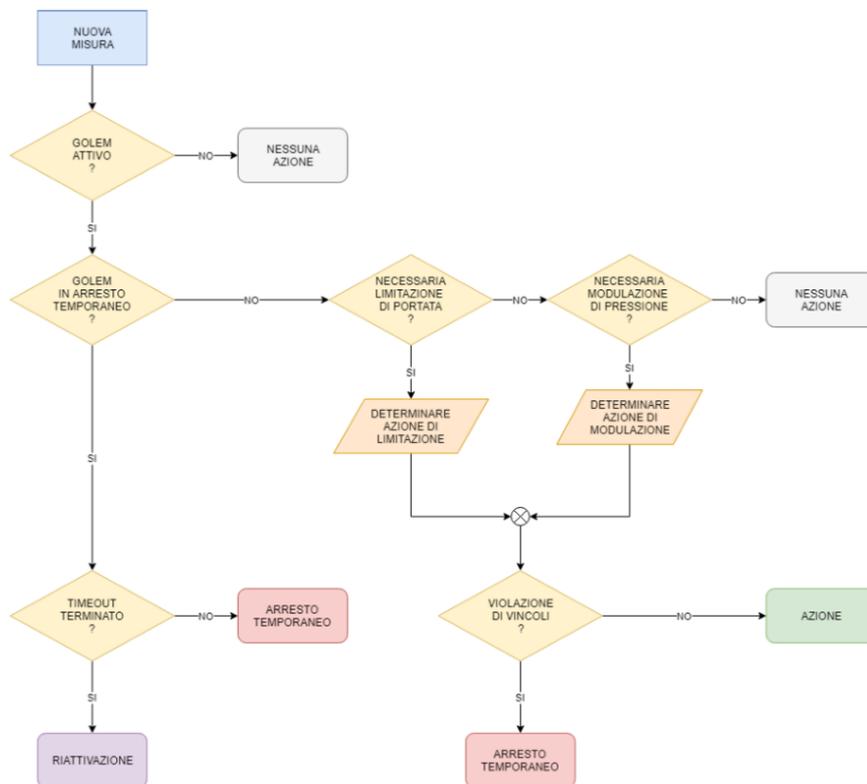


Figura 24: Diagramma flusso operativo [11]

Quando il GOLEM entra in uno stato di ARRESTO TEMPORANEO interrompe tutte le attività per un tempo definito e configurabile. Questa fase termina automaticamente quando finisce il tempo di attesa prefissato; il GOLEM, a partire dal ciclo di misura seguente, torna a gestire le attività previste. Da questo momento, se esistono nuove condizioni di non adempimento o persistono le anteriori, il GOLEM torna in condizioni di ARRESTO TEMPORANEO senza arrivare ad eseguire nessuna regolazione.

Quando non si danno le condizioni per lavorare in modalità LIMITAZIONE DI PORTATA, o non sono attive, il sistema opera in modalità **MODULAZIONE DI PRESSIONE**. Questa modalità si realizza nella forma seguente:

1. Mantenere una pressione obiettivo prefissata dall'operatore in MODULAZIONE REMOTA;
2. Scegliere la pressione obiettivo da mantenere in funzione della fascia oraria in caso sia attiva la MODULAZIONE SECONDO PROFILO SETTIMANALE;
3. Scegliere la pressione obiettivo da mantenere in funzione della fascia percentuale di portata in caso sia attiva la MODULAZIONE PER COMPENSAZIONE DI PRESSIONE.

Il valore istantaneo MISURA DI PRESSIONE è comparato con il valore PRESSIONE OBIETTIVO: se non si trova dentro alla **BANDA DI SENSIBILITÀ**, si passa alla FASE ATTIVA della modulazione con il fine di portare la MISURA DI PRESSIONE dentro a tale banda seguendo un ALGORITMO di avvicinamento.

Quando la MISURA DI PRESSIONE arriva dentro alla **BANDA DI SENSIBILITÀ**, il sistema configura una **BANDA MORTA** intorno alla **PRESSIONE OBIETTIVO**, e la modulazione entra in FASE PASSIVA in attesa di uno dei seguenti eventi:

- La MISURA DI PRESSIONE esce spontaneamente dalla **BANDA MORTA**;
- La **PRESSIONE OBIETTIVO** cambia per effetto dei criteri di modulazione (per esempio cambio della fascia oraria in caso di MODULAZIONE SECONDO PROFILO SETTIMANALE).

Il verificarsi di uno dei suddetti eventi riporta la modulazione nella FASE ATTIVA.

Al fine di informare l'utente sullo **stato di funzionamento** del sistema GOLEM è previsto l'invio a SCADA di un codice numerico che identifica in qualunque momento lo stato del sistema (Tabella 5).

Tabella 5: Codici numerici per l'identificazione dello stato del sistema [11]

	VALORE	CODICE	DESCRIZIONE
B1	0.00	Non attivato	Non è attiva nessuna limitazione o modulazione.
B2	1.00	Successo modulazione	Il GOLEM ha raggiunto la PRESSIONE OBIETTIVO con un valore che si trova all'interno della BANDA DI SENSIBILITÀ di pressione. Il sistema sta aspettando che un valore misurato esca fuori dalla BANDAMORTA per riattivare l'algoritmo e correggere la situazione.
B3	2.00	Successo limitazione	Il GOLEM ha raggiunto la PORTATA OBIETTIVO (con la LIMITAZIONE DI PORTATA attiva) con un valore che si trova all'interno della BANDA DI SENSIBILITÀ di portata. Il sistema sta aspettando che la portata misurata esca fuori dalla BANDA MORTA per attivare un nuovo algoritmo.
B4	3.00	Arresto temporaneo	L'algoritmo si è fermato senza raggiungere l'obiettivo e ha generato un allarme secondario di tipologia C. L'algoritmo torna attivo in maniera automatica dopo un certo tempo definito come TIMEOUT . Ad ogni modo, prima di effettuare un movimento del motore, vengono verificate tutte le condizioni e se viene rilevata qualunque anomalia l'algoritmo si ferma nuovamente segnalando il primo problema rilevato.
B5	4.00	Modulazione in corso	È in corso una MODULAZIONE DI PRESSIONE che regola il movimento del motore in funzione delle letture di pressione effettuate e della PRESSIONE OBIETTIVO fissata.
B6	5.00	Limitazione per impulsi in corso	È in corso una LIMITAZIONE DI PORTATA che regola il movimento del motore in funzione delle letture di portata realizzate dal sistema per mezzo degli impulsi ricevuti e della conversione interna. La limitazione per impulsi si può realizzare solo con la conversione interna.
B7	6.00	Limitazione per tempo in corso	È in corso una LIMITAZIONE DI PORTATA che regola il movimento del motore in funzione delle letture di portata ricevute da un convertitore esterno o, in caso che non sia presente un convertitore esterno, in funzione delle letture di portata realizzate dal sistema per mezzo degli impulsi ricevuti in un tempo determinato e della conversione interna.
B8	7.00	Arresto definitivo	L'algoritmo si è fermato a causa di un errore che ha generato un allarme primario di tipologia A. Questo errore può essere identificato nella schermata degli errori. È necessario l'intervento di un operatore per riavviare il sistema. Non è un arresto temporaneo.

Esiste un'entrata analogica chiamata "**STATO**" che rappresenta lo stato della modulazione in quel momento. Le **regole di rappresentazione** sono le seguenti:

- **MODULAZIONE REMOTA**: valore uguale a **+1,0**;
- **MODULAZIONE SECONDO PROFILO SETTIMANALE**: valore uguale a **+2,0**;
- **MODULAZIONE SECONDO COMPENSAZIONE DI PRESSIONE**: valore uguale a **+3,0**.

Durante il processo di regolazione possono verificarsi le seguenti situazioni:

- Il motore regola per **AUMENTARE LA PRESSIONE**: viene sommato il valore di modulazione **+0,1**;
- Il motore regola per **ABBASSARE LA PRESSIONE**: viene sommato il valore di modulazione **-0,1**;

- Il motore regola per AUMENTARE LA PRESSIONE (in seguito alla necessità di limitazione di portata): viene sommato il valore di modulazione **+0,2**;
- Il motore regola per DIMINUIRE LA PRESSIONE (in seguito alla necessità di limitazione di portata): viene sommato il valore di modulazione **-0,2**.

Un esempio (Figura 25) potrebbe essere la seguente situazione:

1. Inizialmente viene attivata una modulazione remota e l'algoritmo raggiunge il valore obiettivo, prima aumentando poi abbassando la pressione, fino ad ottenere il valore sperato (1,0). Il sistema si ferma dopo la modulazione portando il valore di stato a zero (0).
2. Successivamente, viene configurato un profilo settimanale e per raggiungere il valore obiettivo vengono eseguite diverse regolazioni che portano il valore di stato a (1,9). Poi, dopo un certo periodo di tempo, viene nuovamente aumentata la pressione a causa di una limitazione di portata e il valore di pressione viene stabilizzato su quello programmato. Il valore di stato raggiunge il valore (2,0).
3. Infine viene configurata una modulazione a compensazione della pressione che non genera nessuna regolazione sul motore perché il valore obiettivo era già stato raggiunto.

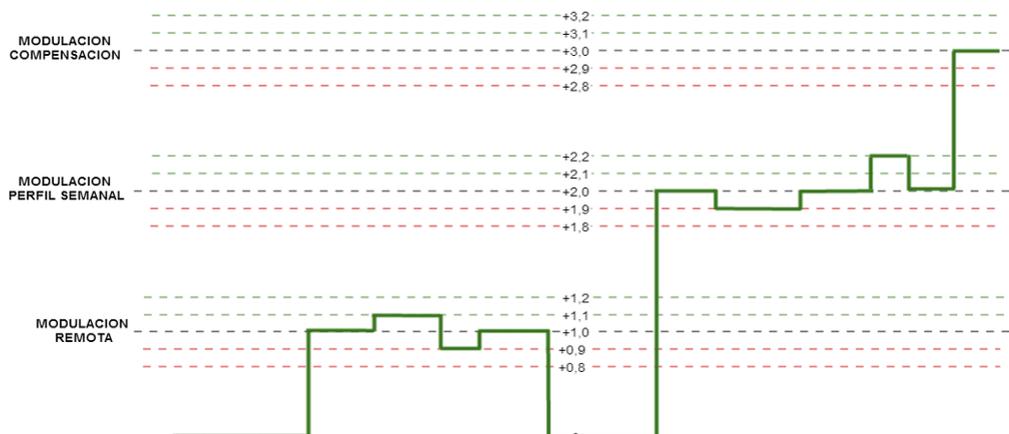


Figura 25: Esempio di modulazione dello STATO del sistema. [11]

I parametri operativi e i valori obiettivo devono essere definiti in maniera che non creino conflitti nella logica di funzionamento del sistema. Tutti i parametri vengono verificati prima di avviare ogni algoritmo di modulazione o limitazione. Se si rileva qualche incoerenza il sistema non avvia la regolazione e notifica l'errore di **"PARAMETRI INCOERENTI"**.

Le modalità operative precedentemente descritte sono state semplificate per facilitare la comprensione dei criteri di funzionamento generali del GOLEM.

In realtà, **ogni attività è composta da vari sotto processi più completi**, i più importanti dei quali si dettagliano a seguire.

L'algoritmo che permette al GOLEM di **raggiungere un valore di pressione obiettivo**, muovendo la vite di regolazione del pilota, tramite azionamento del motore, in un verso o nell'altro, è rappresentato in Figura 26.

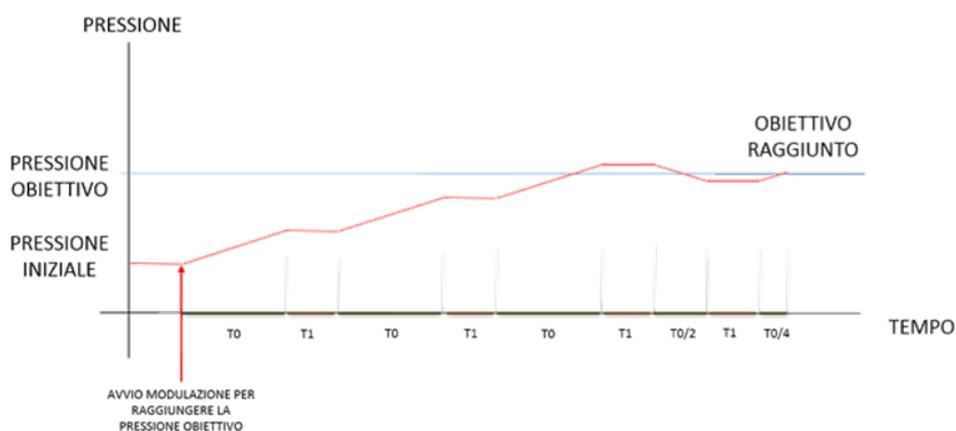


Figura 26: Rappresentazione del funzionamento dell'algoritmo per raggiungere la pressione obiettivo. [11]

1. L'algoritmo, una volta deciso se ridurre o aumentare la pressione, inizia ad alimentare il motore per un tempo assegnato pari al **MOVIMENTO MASSIMO (T_0)**;
2. Se, in seguito alla regolazione viene oltrepassato il valore obiettivo, il tempo di movimento viene diviso per due (**algoritmo dicotomico**) e si attiva una regolazione nel senso contrario per approssimarsi maggiormente al valore obiettivo. Ogni riduzione del tempo di movimento permette di ottenere un'approssimazione più precisa;
3. Se successive divisioni del tempo di movimento portano questo parametro al di sotto del tempo di **MOVIMENTO MINIMO (T_1)**, si interrompe la divisione dicotomica e si applica un tempo di regolazione pari al MOVIMENTO MINIMO (T_1):
 - Il valore consigliato per il MOVIMENTO MINIMO (T_1) è pari a 1.200 ms;
 - Se si configura un valore di MOVIMENTO MINIMO (T_1) troppo elevato può accadere che l'algoritmo si interrompa senza raggiungere un avvicinamento al valore obiettivo sufficiente nel tempo permesso;
 - Se si configura un valore di MOVIMENTO MINIMO (T_1) troppo breve, può non raggiungersi l'obiettivo per mancanza di tempo;
4. L'algoritmo arriva all'obiettivo quando si raggiunge un valore **nell'intorno del valore obiettivo**. L'intorno è definito:

- Come un intervallo a cavallo della **pressione obiettivo**, pari a (+/-) la sensibilità configurata rispetto al fondo scala nella misura di pressione;
 - Come un intervallo al di sotto della **portata obiettivo**, pari a (-) la sensibilità configurata rispetto al fondo scala nella misura di portata;
5. Quando si raggiunge il valore obiettivo (considerando l'intorno di sensibilità descritto), viene configurata una **banda morta** nell'intorno del valore raggiunto:
- Come un intervallo a cavallo della **pressione raggiunta**, pari a (+/-) la banda morta configurata nella misura di pressione;
 - Come un intervallo al di sotto della **portata raggiunta**, pari a (-) la banda morta configurata nella misura di portata.

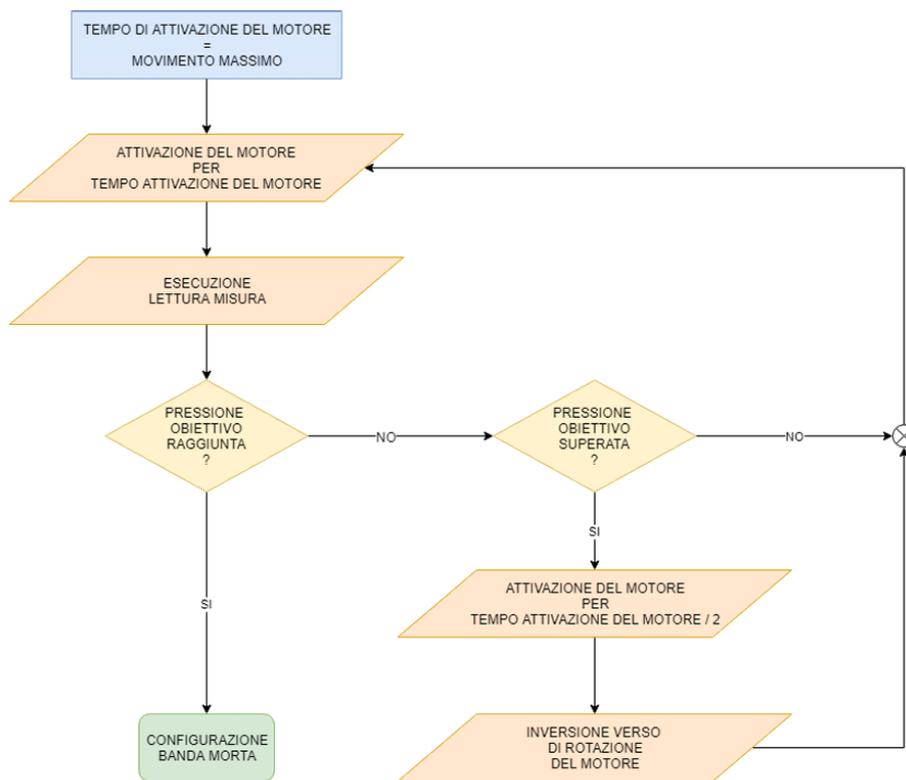


Figura 27: Diagramma dell'algoritmo utilizzato per raggiungere la pressione obiettivo. [11]

Il GOLEM per essere certo di effettuare una **regolazione** (un movimento del motore) solo quando la rete ha reagito agli ultimi cambi, utilizza un algoritmo che verifica l'andamento della rete stessa (**rilevamento stabilità**). Questo viene realizzato per evitare effetti indesiderati generati dalle differenti velocità di reazione che si possono avere in funzione delle differenti condizioni della rete (si consideri come esempio la lentezza di risposta di una rete con una portata molto bassa, in cui le variazioni di pressione si propagano in tempi lunghi). L'algoritmo di **rilevamento della stabilità**

effettua una nuova regolazione del motore solo dopo aver verificato che una serie di misure consecutive (**NUMERO MISURE CONSECUTIVE**) si trovano all'interno della banda di sensibilità rispetto alla prima misura della serie. Un esempio dove la prima misura della serie assume un colore differente lo possiamo vedere in Figura 28.

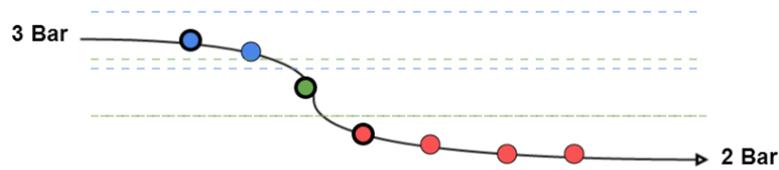


Figura 28: Algoritmo di rilevamento della stabilità. [11]

Questo algoritmo assicura che, se per esempio il motore sta riducendo la pressione, svitando la vite del pilota in una condizione di consumo ridotto o assente (la rete si comprime molto lentamente), non si esegua un nuovo movimento di riduzione finché non si sia raggiunto un valore stabile che garantisca che ha avuto effetto l'ultima azione eseguita. Generalmente si configurano questi valori:

- **NUMERO MISURE CONSECUTIVE:** 4
- **RITARDO MISURA:** 4 s

Di base, **prima di iniziare qualunque regolazione** (un movimento del motore), l'algoritmo valuta se ci sono differenze tra la **misura attuale rilevata** e la **prima misura di una serie**:

- Se la differenza è **maggiore** alla sensibilità configurata, si fissa la misura attuale come prima misura della serie seguente e si iniziano le misure della nuova serie;
- Se la differenza è **inferiore** alla sensibilità configurata, si rimane sulla serie attuale.

Quando si rileva un **NUMERO MISURE CONSECUTIVE coerenti** significa che la rete è stabile, quindi in assenza di fluttuazioni (Figura 29).

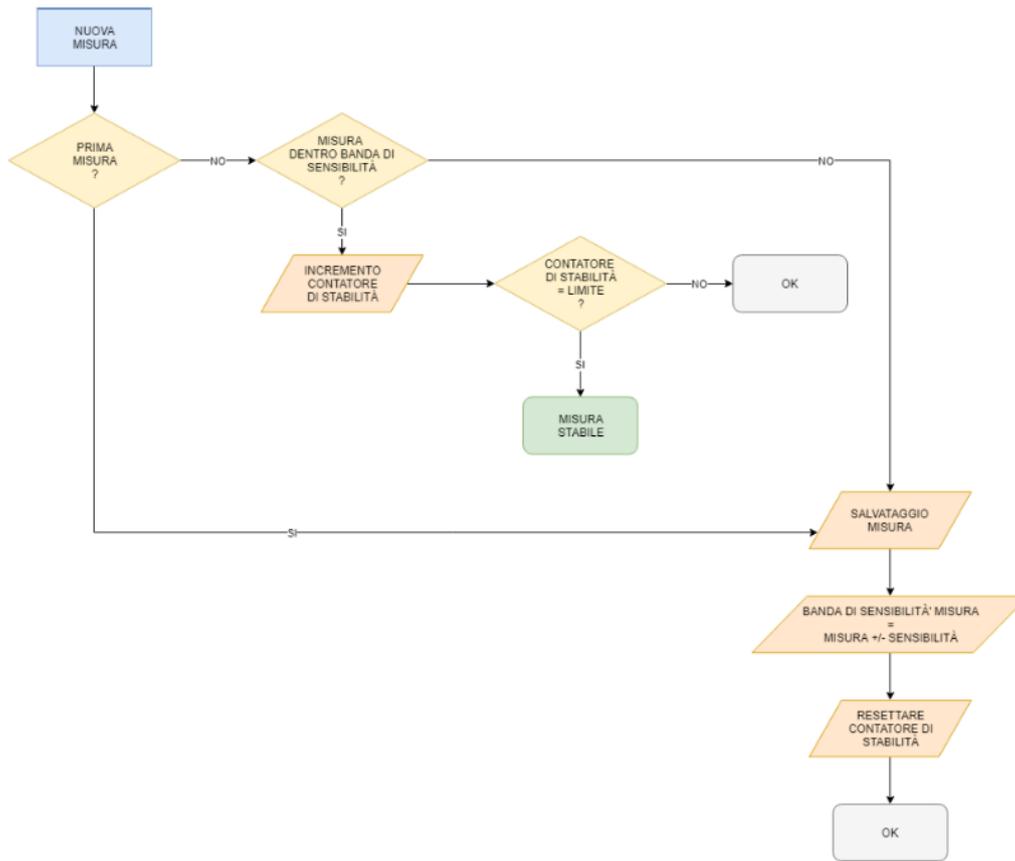


Figura 29: Algoritmo rilevamento stabilit . [11]

Per valutare se c'  una differenza **coerente** tra la misura rilevata prima di effettuare la regolazione e la misura rilevata dopo avere realizzato la regolazione, il GOLEM utilizza l'algoritmo **rilevamento reazione coerente** (Figura 30). Dove con "coerente" si intende che inviando al motore un comando per incrementare (o ridurre) la pressione, deve corrispondere il raggiungimento di un valore di pressione superiore (o inferiore) al precedente. Per valutare la coerenza, viene inizializzato un contatore:

- Se la misura rilevata   **coerente**, viene azzerato il contatore e ripetuto l'algoritmo;
- Se la misura rilevata **non   coerente**, viene incrementato il contatore ed effettuata una nuova misura.

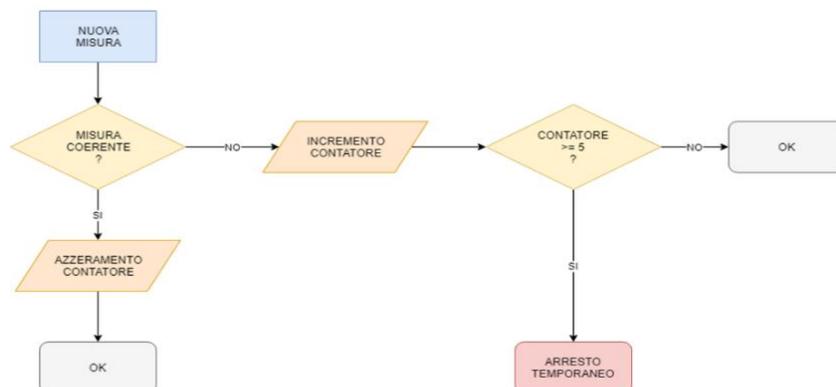


Figura 30: Algoritmo rilevamento reazione coerente.[11]

Quando il contatore arriva a 5 (valore fisso), significa che le ultime regolazioni del motore non hanno avuto successo. Il sistema pertanto si ferma segnalando un ARRESTO TEMPORANEO per TIME OUT.

L'intera gestione del sistema può essere realizzata attraverso le due seguenti schermate di SCADA (Figura 31):

CONFIGURAZIONE MODALITA' OPERATIVA

MODULAZIONE DI PRESSIONE
 ATTIVAZIONE (1 = ON / 0 = OFF) 1 PRESSIONE OBIETTIVO mBar

LIMITAZIONE DI PORTATA
 ATTIVAZIONE (1 = ON / 0 = OFF) 0 PORTATA LIMITE

STATO

ATTIVITÀ

STATO

PRESSIONE RILEVATA mBar PORTATA RILEVATA Nm³/h

ALLARMI

TEMPORANEI	NESSUNA MODIFICA	<input checked="" type="checkbox"/>	DEFINITIVI	PARAMETRI INCOERENTI	<input checked="" type="checkbox"/>
	FINE TEMPO REGOLAZIONE	<input checked="" type="checkbox"/>		PROBLEMA MOTORE	<input checked="" type="checkbox"/>
	PORTATA INSUFFICIENTE	<input checked="" type="checkbox"/>		CIRCUITO APERTO	<input checked="" type="checkbox"/>
	VALORI FUORI LIMITE	<input checked="" type="checkbox"/>		RIAVVIO GOLEM	<input checked="" type="checkbox"/>
	FINE CORSA INFERIORE	<input checked="" type="checkbox"/>		PRESSIONE A ZERO	<input checked="" type="checkbox"/>
	FINE CORSA SUPERIORE	<input checked="" type="checkbox"/>			
	ANOMALIA LIMITAZIONE	<input checked="" type="checkbox"/>			
	ALLARME SISTEMA	<input checked="" type="checkbox"/>			

CONTROLLO DEL SISTEMA

CONFIGURAZIONE DEL SISTEMA

MODULAZIONE DI PRESSIONE

TEMPO MASSIMO DI MOVIMENTO	<input type="text" value="15"/>	s	BANDA MORTA	<input type="text" value="1"/>	%
TEMPO MINIMO DI MOVIMENTO	<input type="text" value="1"/>	s	SENSIBILITÀ	<input type="text" value="0,15"/>	%
RITARDO DI MISURA	<input type="text" value="4"/>	s	NUMERO MISURE CONSECUTIVE	<input type="text" value="3"/>	-
MASSIMO TEMPO DI RISPOSTA	<input type="text" value="600"/>	s	MASSIMA PRESSIONE CONSENTITA	<input type="text" value="6,00"/>	bar
PORTATA MINIMA	<input type="text" value="10"/>	Nm ³ /h	MINIMA PRESSIONE CONSENTITA	<input type="text" value="0,50"/>	bar

LIMITAZIONE DI PORTATA

BANDA MORTA	<input type="text" value="5"/>	%	MASSIMO TEMPO DI RISPOSTA	<input type="text" value="600"/>	s
SENSIBILITÀ	<input type="text" value="2"/>	%	NUMERO DI IMPULSI CONSECUTIVI	<input type="text" value="1"/>	-
MINIMA PRESSIONE CONSENTITA	<input type="text" value="0,70"/>	bar	RITARDO MISURA DI PORTATA	<input type="text" value="0"/>	s

ALTRI PARAMETRI

TEMPO DI ATTESA, IN CASO DI ARRESTO TEMPORANEO, PRIMA DI RITENTARE UNA REGOLAZIONE s

CONFIGURAZIONE DEL SISTEMA

Figura 31: Schermata di controllo del sistema in alto e Schermata configurazione del sistema in basso. [11]

La **schermata di controllo** permette di gestire le 2 modalità operative (modulazione di pressione e limitazione di portata) del sistema e di monitorare le attività.

Mentre la **schermata di configurazione** del sistema permette di definire i parametri operativi al sistema.

Come spiegato, il GOLEM è collegato alla piattaforma per la gestione dei dati raccolti dai dispositivi di monitoraggio e controllo della pressione WEBPRESSURE. L'interfaccia di controllo del sistema messa a disposizione in Figura 32 serve specificatamente per la gestione delle cabine di regolazione.

La schermata in Figura 32 permette di definire una stazione di regolazione ed assegnarvi un dispositivo di monitoraggio e controllo (RTU o datalogger), di definirne i parametri operativi, di ricevere i valori rilevati e di identificare situazioni di allerta. Attraverso le varie schermate in questa interfaccia possiamo visualizzare i parametri relativi allo strumento, visualizzare lo stato operativo del sistema GOLEM ed eventuali segnalazioni di allarme rilevate (GOLEM MONITOR), definire il tipo di modulazione da attivare, definire la pressione obiettivo, decidere se attivare anche la modalità di limitazione di portata e fissare il flusso massimo (CONFIGURAZIONE), definire i parametri operativi necessari al funzionamento in limitazione di portata e in compensazione di pressione (CONFIGURAZIONE LIMITAZIONE), definire le attivazioni a profilo settimanale (CONFIGURAZIONE SETTIMANALE).

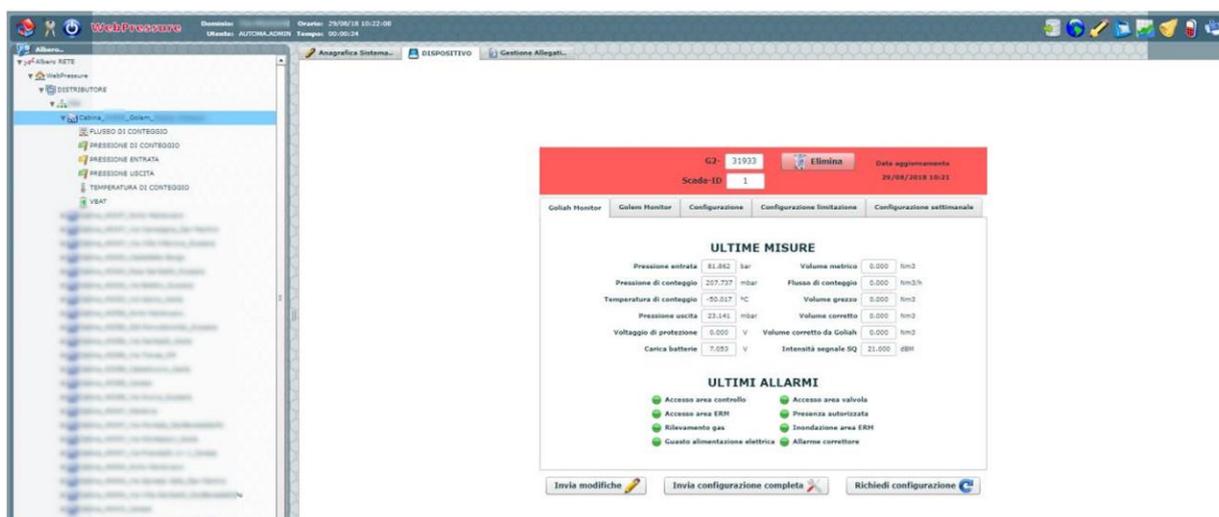


Figura 32: Interfaccia di controllo di WEBPRESSURE. [11]

Quindi riassumendo, il GOLEM è composto di due sottosistemi: uno elettronico ed elettromeccanico.

- Il sistema **elettronico** è formato dal terminale intelligente **G2P** ed i “motor control” **MCTRL**, i quali non hanno bisogno di manutenzioni periodiche perché non contengono elementi elettrici che possono incombere in usura.
- Il sistema **elettromeccanico**, composto da motori, rilevatori di posizione ed accoppiamenti meccanici e contenente elementi elettronici senza deterioramento ed elementi meccanici soggetti a movimentazione.

La manutenzione periodica consigliata per la parte di accoppiamento del motore a contatto con la vite di regolazione del pilota, consiste nell'applicare molto grasso di tipo neutro su tutta la vite del pilota (filettatura e testa) per tutta la sua lunghezza e all'interno del cilindro esagonale che si accoppia alla vite. Si consiglia eseguire una **manutenzione periodica annuale**.

3.2 Risultati ottenuti per la media pressione

In questa sezione verranno illustrati i calcoli effettuati con i relativi risultati per stimare l'impatto della tecnologia GOLEM sulla riduzione delle emissioni di metano generate dai 113.369 Km di reti di distribuzione a media pressione in Italia. L'obiettivo principale di questi calcoli è valutare l'efficacia del GOLEM nel ridurre le emissioni fuggitive di metano, migliorando così l'efficienza operativa e contribuendo alla mitigazione del cambiamento climatico e quindi mitigando anche l'impatto sull'uomo.

La metodologia seguita per questi calcoli può essere suddivisa in 4 fasi principali:

1. Determiniamo il tipo di flusso uscente da un perdite tramite la disequazioni (2) o (3) ;
2. Calcoliamo il tasso medio di emissione di una perdita con una delle due formule (4) o (5);
3. Calcolo delle emissioni di CH₄ in 10h usando la formula (1);
4. Calcolo delle emissioni di CH₄ annuali usando la formula (1).

Per i calcoli in media pressione sono poi state fatte le seguenti assunzioni:

- Le condotte in media pressione in Italia hanno una pressione di esercizio (p_{int}) che solitamente si aggira intorno ai 4,2Bar - 4,6Bar , pertanto per questi calcoli è stata utilizzata una media tra questi due estremi pari a 4,4Bar (440000Pa);
- Il GOLEM attua una regolazione dinamica della pressione adattandosi al tipo di domanda della rete a valle delle cabine RE.MI, pertanto è stata ipotizzata una modulazione della pressione a 3,0 Bar nelle ore dove la domanda a valle delle RE.MI è minore, quindi durante le 8h notturne e 2h diurne per un totale di 10h.

3.2.1 Calcolo delle emissioni di CH4 in MP

1. Determiniamo il tipo di flusso uscente da una perdita:

$$\frac{p_{atm}}{p_{abs}} = \frac{p_{atm}}{p_{int} + p_{atm}} = \frac{101325Pa}{440000Pa + 101325Pa} = 0.19 < \left(\frac{p_{atm}}{p_{abs}} \right)_{crit} \Rightarrow \text{Flusso supersonico}$$

2. Applico la formula (5) per determinare il tasso medio di emissione di una perdita:

$$q_v = 0,315 \frac{m^3}{h}$$

Con $\rho_{int} = 3,0 \frac{Kg}{m^3}$ calcolata con la formula citata nel documento MEEM (8) .

3. Calcolo attraverso la formula (1) le emissioni fuggitive in 10h giornaliere (che saranno le ore in cui il GOLEM andrà ad applicare una modulazione di pressione):

$$E_{CH_4} = 64.114,533 \frac{m^3}{anno}$$

Per il calcolo sono state utilizzate le seguenti grandezze:

$$q_v = 0,315 \frac{m^3}{h}$$

$$t = 10h$$

$$n = 0.191 \frac{\text{perdite}}{Km \cdot anno} \cdot 113.369 Km \cong 21.653 \frac{\text{perdite}}{anno} [26]$$

$$x_{CH_4} = 0,94$$

4. Calcolo le emissioni fuggitive in un anno sempre utilizzando la formula (1), ma considerando un tempo maggiore pari a $t = 8760h$ ossia le ore totali in un anno :

$$E_{CH_4} = 56.164.330,91 \frac{m^3}{anno}$$

$E_{CH_4} = 56.164.330,91 \frac{m^3}{anno}$ sono una stima delle emissioni fuggitive in anno derivanti da danni intrinseci delle tubazioni del gas naturale in media pressione.

3.2.2 Calcolo delle emissioni di CH4 in MP con l'implementazione del GOLEM

Per questo calcolo i passaggi da seguire sono uguali ai precedenti, cambia la pressione interna della tubatura che consideriamo si abbassi a 3,0 Bar (300000 Pa) per 10h nell'arco della giornata.

1. Determiniamo il tipo di flusso uscente da una perdita:

$$\frac{p_{atm}}{p_{abs}} = \frac{p_{atm}}{p_{int} + p_{atm}} = \frac{101325Pa}{300000Pa + 101325Pa} = 0.25 < \left(\frac{p_{atm}}{p_{abs}}\right)_{crit} \Rightarrow \text{Flusso supersonico}$$

2. Utilizzando la formula (5) calcolo il tasso medio di emissione di una perdita:

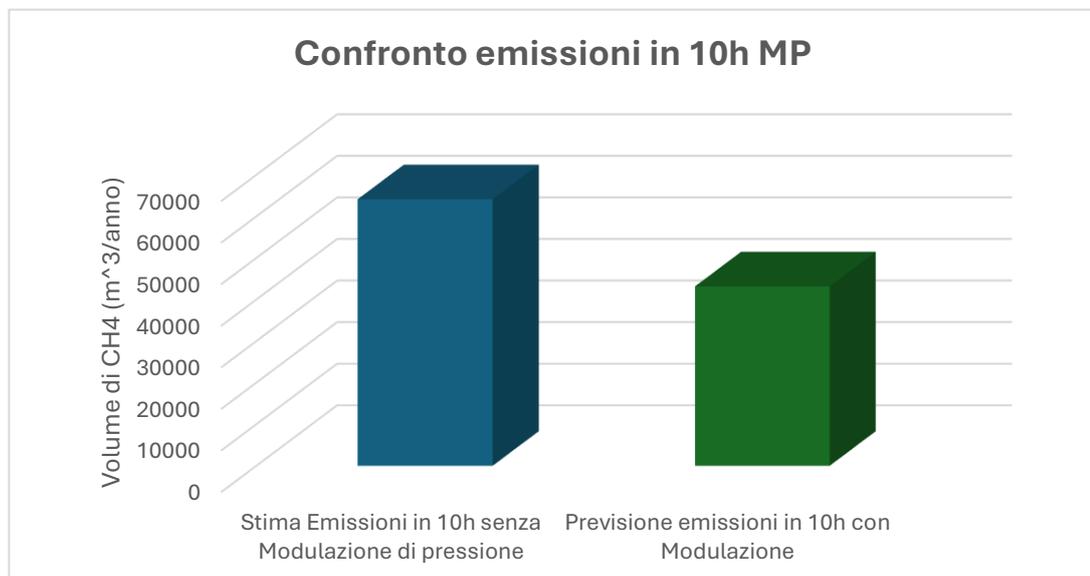
$$q_v = 0,212 \frac{m^3}{h}$$

Con $\rho_{int} = 2,0 \frac{Kg}{m^3}$ calcolata con la formula (8) consigliata nel documento MEEM .

3. Calcolo delle emissioni nelle 10h in cui è attiva la modulazione della pressione con la formula (1):

$$E_{CH_4} = 43.150,098 \frac{m^3}{anno}$$

Possiamo affermare che andando a modulare la pressione a 3,0Bar per 10h al giorno, grazie all'implementazione del GOLEM all'interno delle cabine RE.MI, si prevede una riduzione delle emissioni di metano nell'arco delle 10h del 32.7%.



4. Adesso utilizzando la stessa metodologia andiamo a calcolare le emissioni annuali con l'utilizzo del GOLEM:

$$E_{CH_4,1} = 15.749.785,92 \frac{m^3}{anno}$$

$E_{CH_4,1}$ sono le emissioni di CH₄ in un anno durante le ore in cui il GOLEM è attivo, i dati utilizzati per il calcolo sono i seguenti:

$$q_v = 0.212 \frac{m^3}{h}$$

$$t = 10h \cdot 356gg = 3650h \text{ (Ore totali in cui il GOLEM è attivo)}$$

n e x_{CH_4} sono gli stessi utilizzati nei precedenti calcoli.

Ora calcoliamo le emissioni nelle restanti ore in cui il GOLEM non è attivo:

$$E_{CH_4,2} = 32.762.526,36 \frac{m^3}{anno}$$

Dove sono stati utilizzati i seguenti dati:

$$q_v = 0.315 \frac{m^3}{h}$$

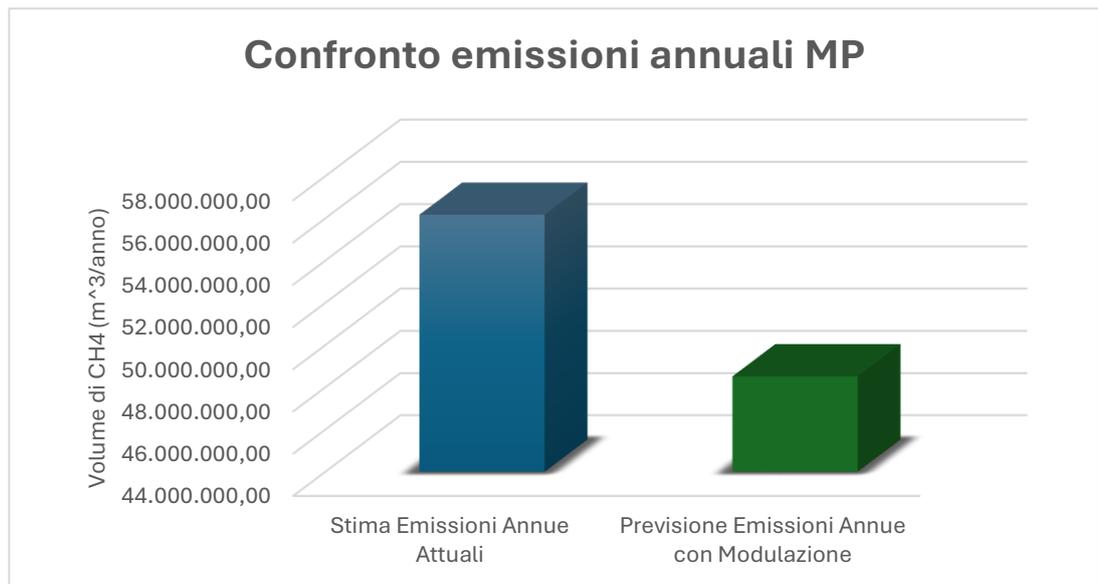
$$t = 8760h - 3650h = 5110h \text{ (Ore restanti in cui il GOLEM non è attivo)}$$

n e x_{CH_4} sono gli stessi utilizzati nei precedenti calcoli.

Quindi ora sommando $E_{CH_4,1}$ e $E_{CH_4,2}$ possiamo ottenere le emissioni fuggitive di metano previste con una modulazione della pressione di esercizio di 3,0Bar per 10h tutti i giorni:

$$E_{CH_4,TOT} = 48.512.312,28 \frac{m^3}{anno}$$

Stando a questi ultimi risultati possiamo affermare che il GOLEM, se inserito all'interno delle cabine RE.MI e operativo per 10h al giorno in modulazione di pressione, può permettere una riduzione delle emissioni annuali del 13.6%. Questi risultati sono visibili nel grafico nella seguente pagina.



3.2.3 Caso pratico: Impianto Casamassima

Per comprendere meglio l'impatto della tecnologia GOLEM sulla riduzione delle emissioni fuggitive di metano derivanti dalle linee in media pressione, è stato analizzato un caso specifico presso la località di Casa Massima (Ba). In questa zona è stata applicata la tecnologia GOLEM in una cabina RE.MI dove si sta sperimentando una significativa riduzione di pressione da 4,0 Bar a 2,0 Bar dalle ore 21:00 fino alle ore 7:00 del giorno seguente, offrendo un'opportunità ideale per valutare l'efficacia della tecnologia in condizioni operative reali.

La metodologia con la quale è stata valuta l'efficacia del GOLEM è la stessa con la quale è stata analizzata la rete di MP in Italia:

- Calcolo delle emissioni senza la tecnologia;
- Calcolo delle emissioni con una modulazione della pressione a 2,0 Bar per 10h.

Calcolo delle emissioni senza modulazione della pressione

1. Determiniamo il tipo di flusso uscente da una perdita:

$$\frac{p_{atm}}{p_{abs}} = \frac{p_{atm}}{p_{int} + p_{atm}} = \frac{101325Pa}{400000Pa + 101325Pa} = 0.20 < \left(\frac{p_{atm}}{p_{abs}} \right)_{crit} \Rightarrow \text{Flusso supersonico}$$

2. Applico la formula (5) per determinare il tasso medio di emissione di una perdita con una p_{int} di 4,0Bar:

$$q_v = 0,285 \frac{m^3}{h}$$

Con $\rho_{int} = 2,7 \frac{Kg}{m^3}$ calcolata con la formula (8), mentre il d_h è lo stesso considerato nei paragrafi precedenti.

3. Calcolo attraverso la formula (1) le emissioni fuggitive in 10h giornaliere:

$$E_{CH_4} = 7,6 \frac{m^3}{anno}$$

Per il calcolo sono state utilizzate le seguenti grandezze:

$$q_v = 0,285 \frac{m^3}{h}$$

$$t = 10h$$

$$n = 0.191 \frac{\text{perdite}}{Km \cdot anno} \cdot 14,925 Km \cong 2.85 \frac{\text{perdite}}{anno} [26]$$

$$x_{CH_4} = 0,94$$

4. Utilizzando sempre la formula (1) calcoliamo le emissioni fuggitive in un anno:

$$E_{CH_4} = 6.688,39 \frac{m^3}{anno}$$

Per il calcolo sono stati utilizzati gli stessi parametri del punto n.3, tranne che per il tempo dove è stato considerato $t = 8760h$ (ore in un anno).

Calcolo delle emissioni con modulazione della pressione

Per questo calcolo i passaggi da seguire sono uguali ai precedenti, cambia la pressione interna della tubatura che consideriamo si abbassi per 10h nell'arco della giornata a 2,0 Bar (200000 Pa).

1. Determiniamo il tipo di flusso uscente da una perdita:

$$\frac{p_{atm}}{p_{abs}} = \frac{p_{atm}}{p_{int} + p_{atm}} = \frac{101325Pa}{200000Pa + 101325Pa} = 0.34 < \left(\frac{p_{atm}}{p_{abs}}\right)_{crit} \Rightarrow \text{Flusso supersonico}$$

2. Con l'equazione (5) calcolo il tasso medio di emissione di una perdita:

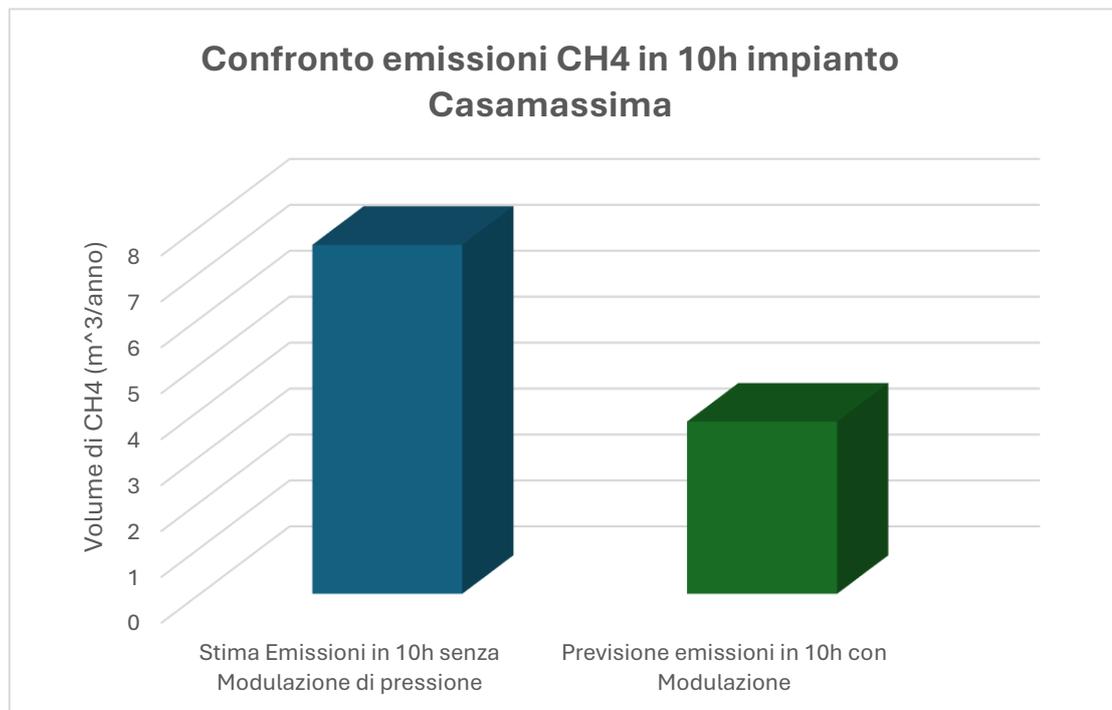
$$q_v = 0,140 \frac{m^3}{h}$$

Con $\rho_{int} = 1,36 \frac{Kg}{m^3}$ calcolata con l'equazione (8) .

3. Calcolo delle emissioni nelle 10h in cui è attiva la modulazione della pressione con la formula (1):

$$E_{CH_4} = 3,75 \frac{m^3}{anno}$$

Possiamo affermare che andando a ridurre la pressione a 2,0Bar nell'arco della giornata, c'è una riduzione delle emissioni di metano in 10h del 50.7%.



4. Adesso utilizzando la stessa metodologia andiamo a ricalcolarci le emissioni annuali durante l'utilizzo del GOLEM:

$$E_{CH_4,1} = 1.368,97 \frac{m^3}{anno}$$

Queste sono le emissioni di CH₄ in un anno durante le ore in cui il GOLEM è attivato, i dati utilizzati sono i seguenti:

$$t = 10h \cdot 356gg = 3650h \text{ (Ore totali in cui il GOLEM è attivo)}$$

$$q_v = 0.140 \frac{m^3}{h}$$

n e x_{CH_4} sono gli stessi utilizzati nei precedenti calcoli.

Ora calcoliamo le emissioni nelle restanti ore in cui il GOLEM non è attivo:

$$E_{CH_4,2} = 3.901,56 \frac{m^3}{anno}$$

Dove sono stati utilizzati i seguenti dati

$$t = 8760h - 3650h = 5110h \text{ (Ore restanti in cui il GOLEM non è attivo)}$$

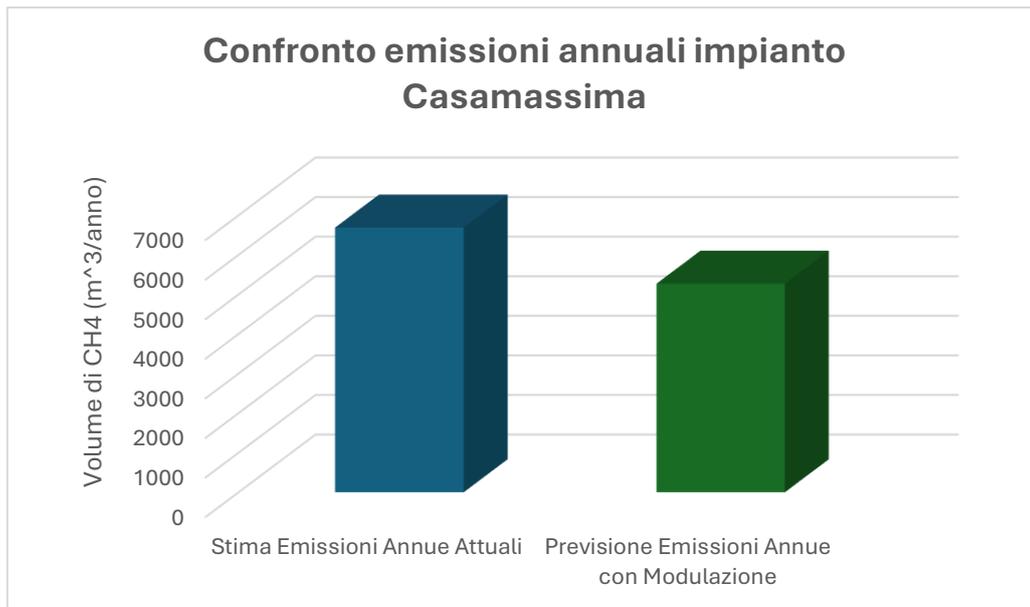
$$q_v = 0.285 \frac{m^3}{h}$$

n e x_{CH_4} sono gli stessi utilizzati nei precedenti calcoli.

Quindi ora sommando $E_{CH_4,1}$ e $E_{CH_4,2}$ possiamo ottenere le emissioni fuggitive di metano previste con una modulazione della pressione di esercizio di 2,0Bar per 10h tutti i giorni:

$$E_{CH_4,TOT} = 5.270,53 \frac{m^3}{anno}$$

Stando a questi ultimi risultati possiamo affermare che il GOLEM inserito all'interno della cabina RE.MI a Casamassima, operativo per 10h al giorno in modulazione di pressione a 2,0Bar, può permettere di ridurre le emissioni annuali del 21,2%. Questi risultati sono visibili nel grafico nella seguente pagina.



Questo risultato ci fa capire come il GOLEM si adatti dinamicamente alla domanda a valle dell'impianti di riduzione della pressione e quindi la riduzione delle emissioni calcolate potrebbero essere maggiori di quanto previsto finora perché è facile pensare come il GOLEM può abbassare la pressione a 2,0Bar anche in altre località come a Casamassima.

3.3 Risultati ottenuti per la bassa pressione

Qui di seguito, sono esposti i calcoli con annessi risultati condotti per stimare l'impatto della tecnologia GOLEM sulla riduzione delle emissioni fuggitive di metano derivanti dai 154.063 Km di reti di distribuzione a bassa pressione in Italia. Analogamente alla media pressione, l'obiettivo principale è valutare l'efficacia del GOLEM nel ridurre le emissioni fuggitive di metano, migliorando così l'efficienza operativa e contribuendo alla mitigazione del cambiamento climatico e quindi mitigare anche quello che è l'impatto sulla salute pubblica.

La metodologia seguita per questi calcoli è la stessa utilizzata per la media pressione, ma cambiano i valori dei parametri presi in considerazione :

- Le reti di distribuzione a bassa pressione in Italia operano solitamente ad una pressione di esercizio che si aggira intorno a 20-25 mmBar, pertanto è stata utilizzata una media delle pressioni di esercizio tipiche pari a 23mmBar (2300 Pa);
- Come per la media pressione è stata ipotizzata una modulazione della pressione a 20mmBar (2000 Pa) nelle ore dove la domanda a valle dei GRF è minore, quindi durante le 8h notturne e 2h diurne per un totale di 10h.

3.3.1 Calcolo delle emissioni di CH4 in BP

1. Determiniamo il tipo di flusso uscente da una perdita:

$$\frac{p_{atm}}{p_{abs}} = \frac{p_{atm}}{p_{int} + p_{atm}} = \frac{101325Pa}{2300 + 101325Pa} = 0,97 > \left(\frac{p_{atm}}{p_{abs}}\right)_{crit} \Rightarrow \text{Flusso subsonico}$$

2. Applico la formula (4) per determinare il tasso medio di emissione di una perdita:

$$q_v = 3,990 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h}$$

Con $\rho_{int} = 1,57 \cdot 10^{-2} \frac{Kg}{m^3}$ calcolata con la formula (8) e una $p_{int} = 2300Pa$.

3. Calcolo utilizzando la formula (1) le emissioni fuggitive derivanti dalla BP in 10h giornaliere (che saranno le ore in cui il GOLEM andrà ad applicare una modulazione di pressione):

$$E_{CH_4} = 1103,65 \frac{m^3}{anno}$$

Per il calcolo sono state utilizzate le seguenti grandezze:

$$q_v = 3,990 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h}$$

$$t = 10h$$

$$n = 0,191 \frac{\text{perdite}}{Km \cdot anno} \cdot 154.063 Km \cong 29.426 \frac{\text{perdite}}{anno} [26]$$

$$x_{CH_4} = 0,94$$

4. Calcolo con la formula (1) le emissioni fuggitive che derivano dalla BP in un anno :

$$E_{CH_4} = 966.798,76 \frac{m^3}{anno}$$

Per il calcolo sono stati utilizzati gli stessi parametri del punto n.3, ma è stato considerato $t = 8760h$ (ore in un anno).

3.3.2 Calcolo delle emissioni di CH4 in BP con l'implementazione del GOLEM

Per questo calcolo i passaggi da seguire sono uguali ai precedenti, cambia la pressione interna della condotta che consideriamo si abbassi a 20 mmBar (2000 Pa) per 10h nell'arco della giornata.

1. Determiniamo il tipo di flusso uscente da una perdita:

$$\frac{p_{atm}}{p_{abs}} = \frac{p_{atm}}{p_{int} + p_{atm}} = \frac{101325Pa}{2000Pa + 101325Pa} = 0,98 > \left(\frac{p_{atm}}{p_{abs}}\right)_{crit} \Rightarrow \text{Flusso subsonico}$$

2. Con la formula (4) calcolo il tasso medio di emissione di una perdita:

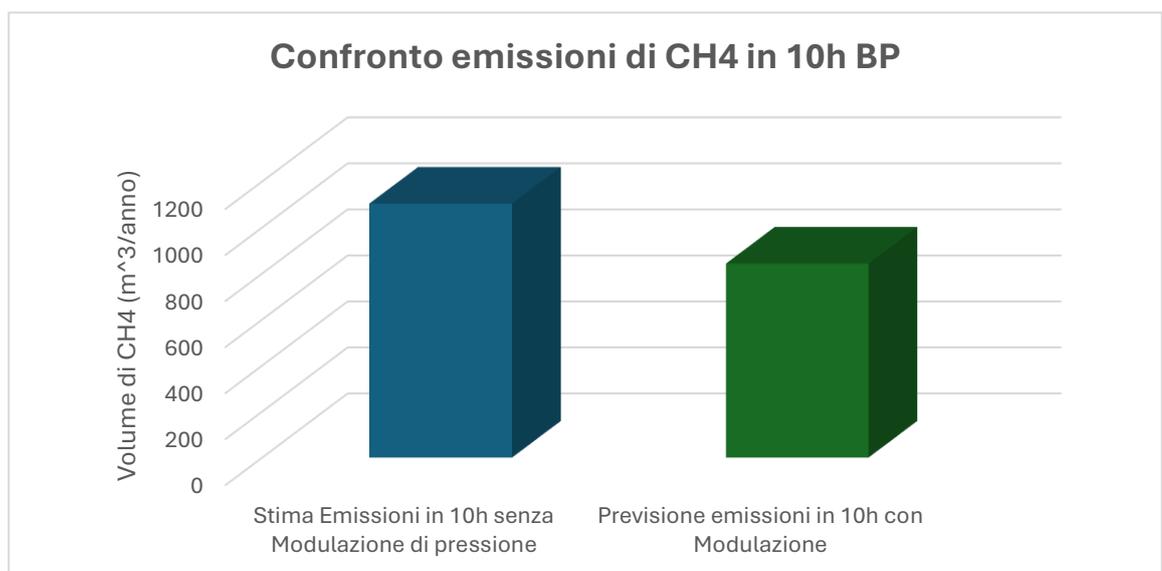
$$q_v = 3,047 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h}$$

Con $\rho_{int} = 1,36 \cdot 10^{-2} \frac{Kg}{m^3}$ calcolata con la formula (8) e una $p_{int} = 20mmBar$.

3. Calcolo delle emissioni derivanti dalla BP nelle 10h in cui è attiva la modulazione della pressione con la formula (1):

$$E_{CH_4} = 842,97 \frac{m^3}{anno}$$

Confrontando con i risultati ottenuti in precedenza senza modulazione di pressione, possiamo affermare che andando a ridurre la pressione a 20mmBar per 10h al giorno c'è una riduzione delle emissioni di metano del 23,62%.



4. Adesso utilizzando la stessa metodologia andiamo a calcolarci le emissioni annuali con l'utilizzo del GOLEM:

$$E_{CH_4,1} = 307.626,96 \frac{m^3}{anno}$$

$E_{CH_4,1}$ sono le emissioni di CH₄ in un anno durante le ore in cui il GOLEM è attivo, i dati utilizzati per il calcolo sono i seguenti:

$$t = 10h \cdot 356gg = 3650h \text{ (Ore totali in cui il GOLEM è attivo)}$$

$$q_v = 3,047 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h}$$

$$n \cong 29.426 \frac{\text{perdite}}{\text{anno}}$$

$$x_{CH_4} = 0,94$$

Ora calcoliamo le emissioni nelle restanti ore in cui il GOLEM non è attivo:

$$E_{CH_4,2} = 563.965,64 \frac{m^3}{anno}$$

Dove sono stati utilizzati i seguenti dati

$$t = 8760h - 3650h = 5110h \text{ (Ore restanti in cui il GOLEM non è attivo)}$$

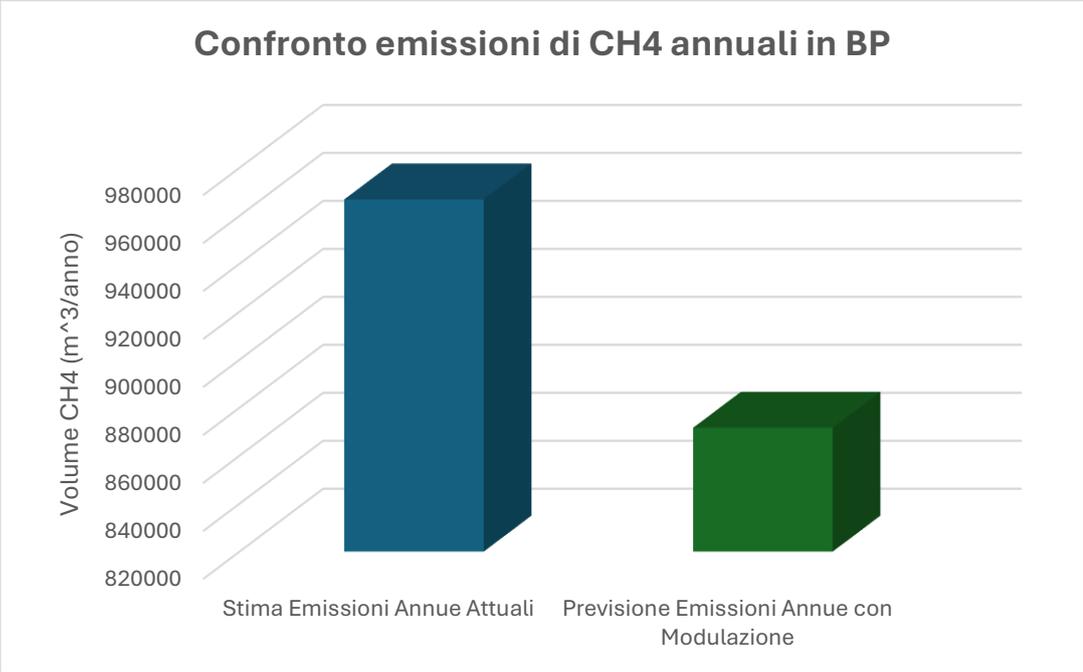
$$q_v = 3,99 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h}$$

n e x_{CH_4} sono gli stessi utilizzati nei precedenti calcoli.

Quindi ora sommando $E_{CH_4,1}$ e $E_{CH_4,2}$ possiamo ottenere le emissioni fuggitive di metano previste con una modulazione della pressione di esercizio di 20mmBar per 10h tutti i giorni:

$$E_{CH_4,TOT} = 871.592,9 \frac{m^3}{anno}$$

Stando a questi ultimi risultati possiamo affermare che il GOLEM, se inserito all'interno dei GRF e operativo per 10h al giorno in modulazione di pressione, può permettere di ridurre le emissioni annuali del 9,84%. Questi risultati sono visibili nel grafico nella seguente pagina.



Conclusioni

In conclusione il lavoro svolto in questa tesi ha evidenziato l'importanza cruciale di affrontare le emissioni di metano nelle reti di distribuzione del gas naturale come parte integrante delle strategie di mitigazione del cambiamento climatico e di protezione della salute umana. Attraverso un'analisi dettagliata dei dati e la valutazione dell'impatto della tecnologia GOLEM, è stato dimostrato che l'adozione di soluzioni innovative può portare a significative riduzioni delle emissioni di gas serra.

Il metano essendo un potente gas serra ha effetti profondi non solo sull'ambiente, ma anche sulla salute pubblica. Le emissioni fuggitive di metano contribuiscono all'inquinamento atmosferico, che è stato associato a una vasta gamma di problemi di salute, tra cui malattie cardiovascolari, respiratorie e altre condizioni croniche. Infatti, il metano contribuisce alla formazione di ozono troposferico, un inquinante che ha effetti diretti sulla salute umana. L'inalazione di ozono può causare infiammazioni polmonari, peggiorare l'asma e ridurre la funzione polmonare, aumentando il rischio di infezioni respiratorie e altre malattie polmonari. Inoltre, l'ozono troposferico è associato a un aumento delle malattie cardiovascolari, come l'ipertensione, l'ictus e l'infarto miocardico.

La riduzione delle emissioni di metano attraverso tecnologie avanzate come il GOLEM può quindi avere un duplice beneficio: mitigare gli effetti del cambiamento climatico e migliorare la qualità dell'aria, riducendo i rischi per la salute umana. La tecnologia GOLEM, attraverso la sua capacità di regolare dinamicamente la pressione nelle reti di distribuzione del gas naturale, evita sovrappressioni che possono aumentare le fughe di gas, riducendo così le emissioni di metano. Questo non solo migliora l'efficienza operativa delle reti di distribuzione riducendo gli sprechi, ma porta anche a significativi benefici per la salute pubblica.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione della tecnologia GOLEM nelle reti di distribuzione a media e bassa pressione hanno mostrato una notevole efficacia nel controllo delle emissioni con una riduzione annuale delle emissioni di metano del 13.6% per la media pressione e del 9.84% per la bassa pressione. Il caso di studio specifico presso la località di Casa Massima ha fornito un esempio concreto di come una riduzione della pressione di esercizio possa tradursi in minori emissioni di metano ottenendo una riduzione annuale 21,2% e nell'arco delle 10 ore in cui il GOLEM è attivo del 50,7%, confermando il potenziale di questa tecnologia per essere applicata su larga scala. Si prevede che l'applicazione del GOLEM in questa località porterà ad una riduzione delle emissioni di metano quindi a un miglioramento della qualità dell'aria, con conseguenti benefici per la salute dei residenti, tra cui una riduzione dei sintomi respiratori e delle visite ospedaliere legate a malattie respiratorie e cardiovascolari.

Inoltre, la riduzione delle emissioni di metano contribuisce alla diminuzione del riscaldamento globale, che a sua volta riduce l'incidenza e la gravità delle ondate di calore. Questi eventi estremi hanno un impatto significativo sulla salute umana, aumentando il rischio di disidratazione, colpi di calore, malattie cardiovascolari e mortalità. Pertanto, mitigare le emissioni di metano ha un effetto diretto e indiretto sulla protezione della salute pubblica.

In sintesi, la ricerca condotta in questa tesi sottolinea l'importanza di integrare innovazioni tecnologiche nella gestione delle infrastrutture del gas naturale per ridurre le emissioni di metano. Questo approccio non solo contribuirà alla lotta contro il cambiamento climatico, ma offrirà anche significativi benefici per la salute pubblica, migliorando la qualità dell'aria che respiriamo. L'adozione di tecnologie come il GOLEM rappresenta un passo avanti verso un futuro più sostenibile e salubre per tutti, evidenziando come l'innovazione possa essere un potente strumento per affrontare le sfide ambientali e sanitarie globali. La tecnologia GOLEM non solo rappresenta una soluzione pratica per le infrastrutture energetiche, ma anche un esempio di come l'ingegneria e la scienza possono convergere per creare un impatto positivo sul benessere umano e sulla protezione del nostro pianeta.

APPENDICE 1- GLOSSARIO DEI TERMINI E PARAMETRI PER IL SISTEMA GOLEM

TABELLA A			
	NOME	DESCRIZIONE	VALORE PREDEFINITO
A1	ALGORITMO	L'insieme dei calcoli, delle azioni e delle decisioni che il sistema GOLEM realizza quando riceve un ordine di raggiungere un obiettivo determinato.	
A2	PRESSIONE OBIETTIVO	Il valore che il GOLEM deve raggiungere muovendo la vite del pilota (azionando il motore) in un verso o nell'altro. Ogni volta che il GOLEM aziona il motore viene eseguita la lettura della pressione della rete per stabilire se l'effetto dei movimenti ha permesso di raggiungere con successo l'obiettivo.	
A3	SENSIBILITÀ IN REGOLAZIONE PER MODULAZIONE DI PRESSIONE	È una percentuale % del fondo scala del sensore di pressione che stiamo utilizzando per misurare la pressione di uscita (che può essere un sensore o un trasmettitore 4-20 mA). Si calcola un limite superiore ed uno inferiore applicando +/- il valore percentuale al valore obiettivo definendo così una banda che serve per fermare il movimento quando il valore di pressione misurato sta dentro questi limiti. Lo scopo di una regolazione per modulazione di pressione, è arrivare ad un valore di pressione prossimo al valore obiettivo all'interno della banda di sensibilità di pressione.	
A4	SENSIBILITÀ IN REGOLAZIONE PER LIMITAZIONE DI PORTATA	È una percentuale % del limite di portata. Lo scopo di una regolazione per limitazione di portata è arrivare ad un valore di portata al di sotto di un valore limite e dentro della percentuale di sensibilità di portata. Serve anche per stabilire se la misura attuale della portata si può considerare diversa dalla precedente.	
A5	MASSIMO TEMPO DI RISPOSTA IN REGOLAZIONE PER MODULAZIONE DI PRESSIONE	Tempo massimo durante il quale il GOLEM attua tentando di arrivare alla pressione obiettivo. Dopo questo tempo il motore si ferma temporaneamente inviando un segnale di arresto temporaneo STOP PER TIMEOUT (C2) prima di provare nuovamente a raggiungere l'obiettivo.	
A6	MASSIMO TEMPO DI RISPOSTA IN REGOLAZIONE PER LIMITAZIONE DI PORTATA	Tempo massimo durante il quale il GOLEM attua tentando di arrivare alla portata obiettivo. Dopo questo tempo il motore si ferma temporaneamente inviando un segnale di arresto temporaneo STOP PER TIMEOUT (C2) prima di provare nuovamente a raggiungere l'obiettivo.	

A7	BANDA MORTA IN REGOLAZIONE PER MODULAZIONE DI PRESSIONE	<p>È l'intervallo intorno al valore misurato che si definisce come +/- una percentuale sul valore di fondo scala della pressione di uscita.</p> <p>Una volta raggiunto un obiettivo, l'algoritmo configura una banda morta intorno all'ultimo valore misurato. Se succede che qualcuna delle misure che vengono eseguite ogni 30 secondi esce dall'intervallo della banda morta, si riavvia la regolazione per ricondurre il valore dentro all'intervallo di sensibilità del valore obiettivo. La regolazione viene riavviata anche quando il valore obiettivo cambia, per esempio se cambia la fascia temporale in caso di modulazione con profilo settimanale o se cambia la portata misurata in caso di regolazione per compensazione di pressione.</p>	1 (%)
A8	BANDA MORTA IN REGOLAZIONE PER LIMITAZIONE DI PORTATA	<p>È l'intervallo sotto al limite di portata che si definisce come una percentuale del limite di portata.</p> <p>Una volta raggiunto l'obiettivo di limitazione, l'algoritmo configura una banda morta al di sotto del valore limite. Se succede che qualcuna delle misure di portata scende al di sotto di questa banda, l'algoritmo di limitazione di portata termina e si avvia la modulazione di pressione, nel caso sia attiva.</p>	
A9	REGOLAZIONE DI PRESSIONE	<p>Una regolazione è un movimento del motore (rotazione in un verso o nell'altro) per aumentare o ridurre la pressione.</p> <p>La regolazione è comandata dall'intelligenza del GOLEM d'accordo con il tipo di modulazione ricevuta e solo quando la lettura della pressione di uscita ha un valore stabile. Il movimento del motore attua sulla taratura del regolatore e non direttamente sul regolatore.</p>	
A10	MODULAZIONE DI PRESSIONE	<p>Una modulazione consiste in una serie di regole per attivare una regolazione del motore stabilendo un valore obiettivo di pressione. Il GOLEM ammette varie modulazioni: REMOTA (valore fisso di pressione), PROFILO SETTIMANALE e COMPENSAZIONE DI PRESSIONE (variazione della pressione che dipende da vari ranghi di portata).</p>	
A11	NUMERO DI MISURE CONSECUTIVE	<p>È il numero di misure consecutive e coerenti (ossia tutte dentro alla banda di sensibilità) per decidere se è necessario effettuare una regolazione. Finché dalla rete non si ricevono misure stabili, l'algoritmo aspetta eseguendo misure.</p>	
A12	RITARDO DI MISURA	<p>È il tempo che trascorre tra una misura e la seguente. È conveniente programmare un tempo nè molto lungo nè molto corto, giacché il GOLEM ha bisogno di ripetere la misura un numero di volte pari ad (A11) prima di reagire. Un tempo troppo lungo comporterà l'obbligo di programmare anche un valore alto di MASSIMO TEMPO DI RISPOSTA (A5).</p>	

A13	MOVIMENTO MASSIMO	Rappresenta il tempo massimo iniziale del movimento del motore in ogni azione che viene realizzata. Il tempo di movimento viene mantenuto costante finché il valore di pressione rilevato a seguito delle regolazioni non supera il valore obiettivo (ossia, fintanto che il valore misurato risulta superiore al valore obiettivo, in caso di regolazione in riduzione, o inferiore al valore obiettivo, in caso di regolazione in aumento). Quando succede questo, il successivo valore del tempo di movimento si divide per due ogni volta che si oltrepassa la linea del valore obiettivo, fino ad un minimo definito con il parametro MOVIMENTO MINIMO.	
A14	MOVIMENTO MINIMO	Rappresenta il tempo minimo di movimento del motore al quale non si applica la regola dicotomica (divisione per due) quando ci si trova vicino all'obiettivo. È importante assegnare questo tempo come il più breve possibile, ma pur sempre sufficiente per far sì che in questo tempo si possa generare una variazione di pressione vicina alla sensibilità (valore ideale 1200ms). Se questo tempo è molto esteso non si otterrà una regolazione precisa del valore obiettivo e, d'altra parte, se è molto basso non si otterrà l'obiettivo e l'algoritmo si fermerà sempre per aver raggiunto il MASSIMO TEMPO DI RISPOSTA.	1200 ms
A15	MINIMA PRESSIONE PERMESSA IN MODULAZIONE DI PRESSIONE	Se la pressione misurata è inferiore a questo valore, non si può effettuare nessun movimento per diminuire ulteriormente la pressione. Questo limite si applica solo alla modulazione di pressione.	
A16	MINIMA PRESSIONE PERMESSA IN LIMITAZIONE DI PORTATA	Se la pressione misurata è inferiore a questo valore, non si può effettuare nessun movimento per diminuire ulteriormente la pressione. Questo limite si applica solo alla limitazione di portata.	
A17	MASSIMA PRESSIONE PERMESSA	Se la pressione misurata è superiore a questo valore, non si può effettuare nessun movimento del motore per aumentare ulteriormente la pressione. Questo limite si applica sempre.	
A18	LIMITAZIONE DI PORTATA	La limitazione di portata è una funzionalità che permette di effettuare un bilanciamento della emissione della stazione dove si installa il GOLEM . Per ottenere questo, si limita la portata della stazione di regolazione a un valore massimo fisso. Se questo limite viene superato, il GOLEM tenta di abbassare la pressione (e quindi abbassare la portata) fino al valore massimo di pressione che produce la portata massima permessa.	

A19	NUMERO DI IMPULSI CONSECUTIVI DEL CONTATORE	È il numero di impulsi consecutivi necessari per definire il valore di portata valido dopo un movimento di limitazione. Si applica solo in caso in cui il tempo RITARDO DI MISURA DELLA PORTATA è a 0.	
A20	RITARDO DI MISURA DELLA PORTATA	È il tempo di attesa al fine di ottenere un nuovo valore di portata, misurato con gli impulsi letti in questotempo o, nel caso di ricevere il dato da un convertitore, il tempo di attesa per ricevere un nuovo valore di portata. Quando viene messo a 0 non viene utilizzato il NUMERO DI IMPULSI CONSECUTIVI DEL CONTATORE.	
A21	PORTATA MINIMA PER EFFETTUARE LA MODULAZIONE	È il valore minimo di portata necessario per eseguire qualunque regolazione. Se il valore di portata misurata è inferiore a questo valore, il GOLEM non comincia la modulazione e rimane in attesa che il valore salga in maniera spontanea. Nel frattempo il sistema continua ad eseguire misure di portata.	
A22	MASSIMA COMPENSAZIONE DI PORTATA	È il valore di portata che serve per calcolare i dieci ranghi utilizzati per la compensazione.	
A23	RANGO 1=0-10 % RANGO 2=10-20 % [...] RANGO 10=90-100 %	In compensazione di pressione, la MASSIMA COMPENSAZIONE DI PORTATA (A22) si divide in dieci ranghi di percentuali; per ogni rango si applica il valore di pressione obiettivo da raggiungere quando il valore di portata si trova nel rango corrispondente.	

Bibliografia

- [1] Giorgini P. et al. Climate Changes and Human Health: A Review of the Effect of Environmental Stressors on Cardiovascular Diseases Across Epidemiology and Biological Mechanisms. *Curr Pharm Des* (2017).
- [2] False fix: the hidden health impacts of Europe's fossil gas dependency. HEAL (8th May 2022)
- [3] Effetti dell'ozono troposferico sulla salute umana in un contesto di cambiamenti climatici. EEA (02 Mar 2023).
- [4] Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. UNEP-CCAC (2021).
- [5] Air quality in Europe 2022. EEA (24 Nov 2022).
- [6] Solberg, S., et al. Long-term trends of air pollutants at national level 2005-2019. Relazione ETC/ATNI n. 9/2021 (31 Jan 2022).
- [7] Direttiva 2008/50/CE del parlamento europeo e del consiglio del 21 maggio 2008 relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea (2008).
- [8] Europe's air quality status 2022. EEA (01 Apr 2022)
- [9] Orru, H., et al. Ozone and heat-related mortality in Europe in 2050 significantly affected by changes in climate, population and greenhouse gas emission. *Environmental Research Letters* 14 074013 (2019).
- [10] Selin, N.E., et al. Global health and economic impacts of future ozone pollution. *Environmental Research Letters* 4 044014 (2009).
- [11] Vari documenti e PowerPoint AUTOMA.
- [12] Snam Rete Gas.
- [13] Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. IPCC (2021).
- [14] Saunio et al. The Global Methane Budget 2000-2017. *Earth System Science Data* (15 Jul 2020).
- [15] Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC (1996).
- [16] Domenico Gaudioso. Le emissioni di metano in Italia. Report WWF (2022)
- [17] Daniela Romano et al. Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2019. National Inventory Report 2021. ISPRA (2021).

- [18] Simon Eggleston et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC (2006).
- [19] Lauvaux et al. Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters. Science (3 Feb 2022).
- [20] It Happens Here Too: Methane Pollution in Europe's oil and gas network. CAFT (2021).
- [21] Piano nazionale integrato per l'energia e il clima (PNIEC). Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2019).
- [22] Strategia italiana di lungo termine sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ministero delle Politiche agricole, Alimentari e Forestali (2021).
- [23] Study on the future role of gas from a regulatory perspective. CEER (2018).
- [24] Reti di trasporto e distribuzione del gas naturale: progetti pilota di ottimizzazione della gestione e utilizzi innovativi. ARERA (2020).
- [25] Gert Müller-Syring et al. Methane Emission Estimation Method for the Gas Distribution Grid (MEEM). DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH (2018).
- [26] Relazione annuale 2023. ARERA (2022)